

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Попова Елена Александровна

**Эколого-геохимическая оценка состояния оз. Сапшо (Национальный парк
«Смоленское Поозерье»)**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:
д. г-м. н., проф. А. Ю. Опекунов

«__»_____2017

Заведующий кафедрой:
д. б. н., проф. В. Н. Мовчан

«__»_____2017

Санкт-Петербург 2017

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Физико-географическая характеристика района исследований.. ..	4
1.1. Географическое положение	4
1.2. Климат	5
1.3. Рельеф и геологическое строение	7
1.4. Гидрография	11
1.5. Растительный мир	13
1.6. Почвенный покров	16
1.7. Экологическое состояние территории	18
1.8. Описание объекта исследований	21
Глава 2. Методика исследований	22
2.1. Методика полевых исследований донных осадков	22
2.2. Методика лабораторного анализа донных осадков	23
2.3. Методика камеральной обработки материалов	25
Глава 3. Результаты исследования озера	26
3.1. Гранулометрический состав донных осадков и содержание органического углерода	27
3.2. Анализ показателей воды за предыдущие годы исследований, изучение концентраций тяжёлых металлов в водной биоте	33
3.3. Анализ пространственного распределения валового содержания элементов в донных осадках в 2014-2015 гг.	40
3.4. Анализ пространственного распределения валового содержания элементов и их подвижных форм в донных осадках в 2016 г.	47
Выводы	65
Литература и Интернет-источники	67

Введение

Национальный парк – территория, на которой ограничена хозяйственная деятельность человека с целью охраны окружающей среды. Полное же ограничение деятельности человека на какой-то территории невозможно и, скорее всего, бессмысленно, ведь в настоящее время влияние человека на окружающую его среду глобально. Данная работа направлена на изучение влияния человека (в непромышленных масштабах) на конкретный водный объект на территории национального парка (НП) «Смоленское Поозерье» и выявление геохимических признаков такового.

Объект исследований – озеро Сапшо, относящееся к центральной группе озёр национального парка. Его характеристики, такие как, например, площадь зеркала в 2,88 км², самая большая среди озёр в этой части национального парка, географическое положение (в центре НП), промысловая (наличие рыбных ресурсов) и эстетическая ценность сделали пос. Пржевальское на берегу центром туризма и местом отдыха как местных жителей, так и приезжих. Целью работы является исследование эколого-геохимического состояния озера на основе изучения донных отложений и других компонентов водной системы. В рамках данной работы поставлены следующие задачи:

1. Полевое обследование озера;
2. Отбор проб донных осадков по регулярной сети при помощи ковша-дночерпателя;
3. Отбор проб гидробионтов (рыб и моллюсков);
4. Определение гранулометрического состава отложений;
5. Определение количества органических веществ в виде органического углерода;
6. Химический анализ как валового содержания, так и концентраций подвижных форм тяжёлых металлов в пробах;
7. Изучение состояния воды по имеющимся литературным данным;
8. Статистическая обработка данных;
9. Построение карт-схем распределений параметров;
10. Как результат - выявление зависимостей распределения тяжёлых металлов в осадках и наличия и масштабов антропогенного влияния на данный объект.

Глава 1. Физико-географическая характеристика района исследований

1.1. Географическое положение

Смоленская область расположена на западе средней полосы Русской равнины. Северная граница ее территории в Сычевском районе доходит до $56^{\circ}5'$ северной широты и южная в Ершичском районе — до $53^{\circ}25'$ северной широты. На западе и на востоке крайние точки соответственно ограничиваются меридианами — в Руднянском районе — $30^{\circ}45'$ и в Гжатском — $35^{\circ}22'$. Площадь всех 38 административных районов области равняется 49000 кв. км. Протяженность области с запада на восток по параллели Смоленска составляет около 280 км, а с севера на юг — по меридиану Рославля — 250 км (Климов, 1951).

Национальный парк «Смоленское Поозерье», на территории которого проводились исследования, был создан в апреле 1992 года на территории северо-восточной части Демидовского и северо-западной части Духовщинского районов (рис.1) (Доклад, 2011).

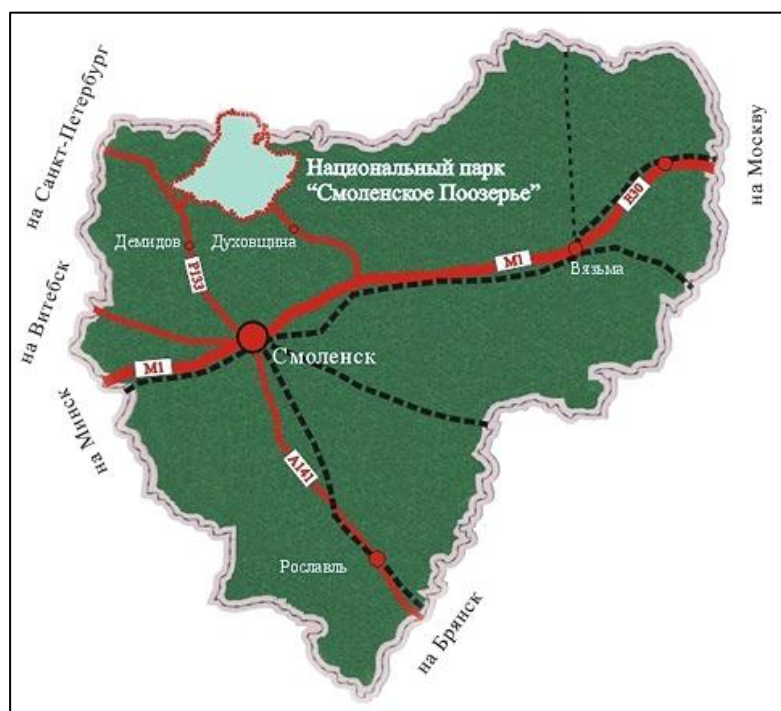


Рис. 1. Расположение НП на территории Смоленской области (www.poozerie.ru)

Парк расположен на площади 146 237 га. Охранная зона, выделенная полосой шириной 500 м вдоль его границ, занимает площадь 7500 га. Основная часть площади парка (107 563 га, или 73,6% от всей его площади) покрыта лесами. Земли сельскохозяйственного назначения включены в площадь парка без изъятия их из сельскохозяйственного производства и составляют 31 804 га (21,7% от всех земель парка). Болота, озера и реки занимают соответственно 2940, 1608 и 458 га (Шкаликов и др., 2005).

Озеро Сапшо, являющееся непосредственным объектом изучения, расположено в центральной части НП к югу от пос. Пржевальское и относится к Пржевальской (центральной) группе озёр НП (наряду с оз. Рытое, Чистик, Глубокое и др.) (рис. 2).

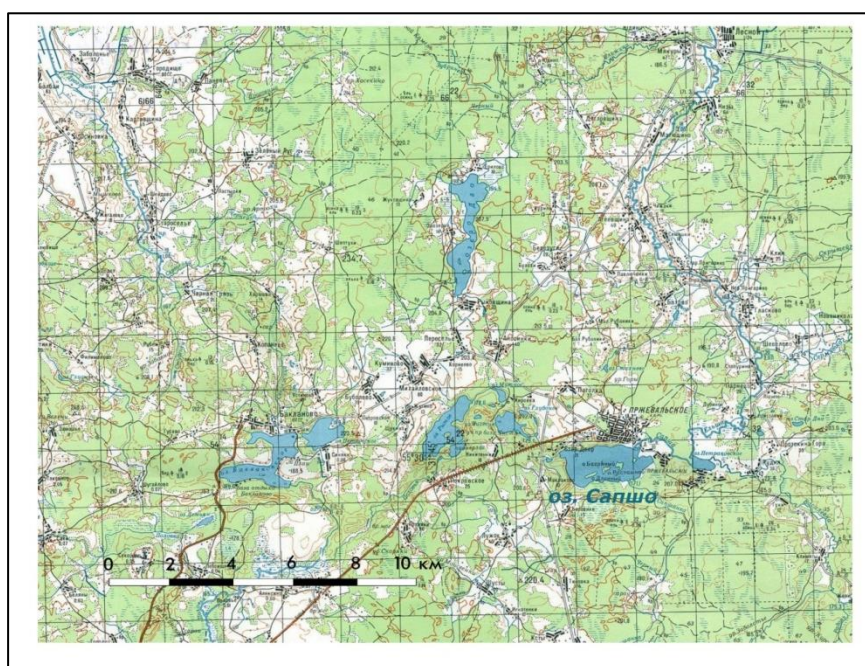


Рис. 2. Расположение оз. Сапшо на топографической карте территории (www.poozerie.ru)

1.2. Климат

Смоленская область расположена в умеренных широтах северного полушария. Климатические условия этой зоны создаются главным образом под влиянием морского и континентального воздуха умеренных широт. Поэтому климат области можно определить как умеренно-континентальный, смягченный близостью Балтийского моря и Атлантического океана. Характеризуется он сравнительно теплым летом и умеренно холодной зимой (Погоуляев, 1959). Расположение на Русской равнине, где сколько-нибудь значительные горные образования отсутствуют, приводит к

беспрепятственному проникновению воздушных масс с различных сторон. Так, с севера на нее приходит арктический воздух. Воздушные массы с Атлантического океана, благодаря наличию широких «ворот» между Альпами и Скандинавскими горами, также свободно проникают на Русскую равнину и на территорию Смоленской области в частности (Климов, 1951). Континентальные черты климата несколько усиливаются в северо-восточной, более высокой, части области, где зима продолжительнее и холоднее, а лето более жаркое (Погоуляев, 1959). Небольшие возвышенности, расположенные среди различных равнинных участков на территории европейской половины СССР, влияют преимущественно на микроклимат местности.

В летнее время на юге Русской равнины зона высокого воздушного давления сохраняется, проявляясь в виде восточного отрога «азорского субтропического максимума». Также сохраняет свое значение и исландская циклональная область, хотя и в менее резкой форме. Вследствие этого и летом в лесной зоне русской равнины преобладающими ветрами являются западные ветры.

Циклоны распространяются с запада (обычно севернее полосы высокого воздушного давления). Благодаря этому на северо-западе Русской равнины, где находится область, часто проходят циклоны, вызывающие ветры, выпадение атмосферных осадков, значительную облачность и резкую смену погоды. Арктические воздушные массы со стороны Баренцева и Карского морей распространяются и на западные районы Русской равнины. Вторжения арктического воздуха вызывают весной и осенью резкие понижения температуры и заморозки, а зимой — усиление морозов.

Территория Смоленской области располагается в пределах Атлантико-континентальной климатической области в западно-европейском ее районе. В этом климатическом районе преобладает перенос атлантического воздуха. Вторжения атлантического воздуха зимой связаны с циклонической деятельностью и сопровождаются обычно выпадением атмосферных осадков.

В зимнее время преобладают юго-западные ветры. Весной в этом районе происходит частая смена холодных и теплых масс воздуха.

Частое вторжение влажных воздушных масс с запада приводит к выпадению атмосферных осадков в количестве 600-650 мм в год, что превышает величину атмосферных осадков, выпадающих в соседних областях на 50—70 мм. Воздух в данной области отличается значительной относительной и абсолютной влажностью. Абсолютная влажность воздуха, изменяясь в соответствии с годовым ходом температуры, близка к величине полного насыщения, особенно в зимние месяцы. О высокой степени насыщения воздуха водяными парами можно судить по

относительной влажности воздушных масс: в ноябре — январе она доходит в среднем до 90 процентов. В мае отмечается наименьшая относительная влажность воздуха - 65—70 процентов.

При содержании в воздухе значительного количества водяных паров, близкого к насыщению воздуха, достаточно бывает небольшого понижения температуры воздушной массы, чтобы произошло выпадение атмосферных осадков. При указанных условиях понятна частота выпадения атмосферных осадков. В течение года насчитывается около 200 дней с осадками (Климов, 1951).

Среднегодовые температуры воздуха для области положительны и находятся в пределах от 3,83° (Тяполово) до 4,86° (Рославль). Средняя годовая температура для всей области около 4,3°. Самый теплый месяц — июль и самый холодный — январь. (Кучинский, 1950). Сравнительно более суровый температурный режим наблюдается на северо-востоке области, более теплый — в юго-западных и крайних северо-западных районах (Погуляев, 1959).

Резкие колебания температуры, возникающие при соприкосновении континентальных, более сухих, и западных, более влажных, воздушных масс приводят к образованию туманов. В течение года насчитывается до 25—30 дней с туманами.

Если судить по многолетним средним величинам о высоте снегового покрова, то последний имеет достаточную мощность с декабря по апрель. Следовательно, продолжительность более или менее устойчивого снегового покрова равняется 120 — 130 дням (Климов, 1951).

1.3. Рельеф и геологическое строение

Территория Смоленской области занимает почти центральное положение на обширной Русской равнине и ее рельеф является типичным для средней полосы (Природа Смоленской области, 1973).

Большая часть территории Смоленской области располагается на Смоленско-Московской слабоволнистой возвышенности. Лишь на сравнительно небольших пространствах область принадлежит к низменностям Прибалтийской (на северо-западе) и Приднепровской (на юго-западе). Абсолютные высоты над уровнем моря на территории области колеблются в пределах 140—320 метров. Средние высоты 200—240 метров. По подсчетам О. А. Мещерякова (1960), средняя высота Русской равнины равна 141 м. На этом фоне территория области выделяется как относительно приподнятый участок. Территория области расположена в пределах Русской плиты, где кристаллический фундамент перекрыт мощной толщей морских и ледниковых

отложений (от 700 до 1200 м). Поверхность кристаллических пород в целом имеет северный уклон и снижается в пределах области от 500 (юг области) до 1000 м, то есть примерно на 500 м.

В рельефе на более возвышенных частях области отчетливо выделяется несколько грядообразных поднятий — Вяземское, Духовщинское, Кармановское, Рославльское, Ельнинско-Дорогобужское и другие. Наиболее высокое поднятие — Вяземское, или Вяземская гряда. На территории области имеется ряд низин, среди которых отметим Касплянскую (Демидовская котловина), Березинскую (Руднянскую), Ипутскую, Западно-Двинскую, Вяземско-Гжатскую (Сычевскую). Высокие гряды и низины влияют на климат и на почвы отдельных частей территории области. Некоторые климатические особенности ряда районов Смоленщины надо прежде всего ставить в зависимость от рельефных условий. Особенно это касается северо-западной части области. Пестрота здешних почв по механическому составу, кислотности и увлажненности в значительной степени объясняется рельефными особенностями этой местности, наличием здесь конечно-моренных гряд и межгрядовых понижений.

Территория Смоленской области располагается на стыке крупных тектонических структур Русской платформы: Московской палеозойской котловины (на западе), Днепровско-Донецкой впадины (на юге) и Белорусского поднятия (на северо-западе). Такое положение Смоленщины обусловило сложность геологического строения ее территории и особенности этого строения в отдельных ее частях и районах.

Моря неоднократно заливали территорию области частично или полностью. Ввиду этого породы, слагающие территорию области, разнообразны. Принадлежат они девонской, каменноугольной, юрской, меловой, третичной и четвертичной системам.

Девонские отложения — наиболее древние из известных на территории области — представлены известняками, доломитами, мергелем, песчаниками и другими породами. Распространены они по всей территории. Залегают довольно глубоко, лишь в немногих пунктах эти отложения выходят на поверхность земли (по рекам Каспле и Гобзе — в районе г. Демидова и по реке Сож — в д. Богдановка Хиславичского района). Мощность девонских отложений достигает, по-видимому, 500—600 метров. Девонским отложениям подчинен мощный комплекс водоносных горизонтов с большим напором.

Каменноугольные отложения представлены глинами, песками, известняками, доломитами и другими породами. Распространены они в восточной половине области. Общая мощность их ближе к восточной и северо-восточным границам области

достигает 200 метров. Слои каменноугольных отложений наклонены на восток, к центру Подмосковной котловины.

Юрские отложения распространены на южной окраине области (Рославльский, Шумячский, Ершичский районы). Представлены они глинами и песками. Юрские глины выходят на поверхность в долине реки Десны (д. Автуховка). На остальном пространстве своего распространения они залегают довольно глубоко под меловыми и четвертичными отложениями.

Меловые отложения — мел, мергель, глауконитово-кварцевые пески и другие породы — общей мощностью в несколько десятков метров широко распространены в центральной и южной частях области, в бассейнах рек Сож, Десна, Угра. Перечисленные породы вскрываются долинами рек указанных бассейнов (Погуляев, 1959).

В кайнозойскую эру территория Смоленской области представляла собой сушу, за исключением юга, куда в первую половину третичного периода (палеоген) заходило мелководное море. Четвертичный период характеризовался наступанием с севера ледников.

Третичные отложения представлены в области кварцевыми слюдистыми песками и зеленовато серыми, иногда цветными глинами. Эти отложения относятся к палеогену; распространены они в виде пятен различной величины. Мощность песков 2—3 м, глин—около 0,5—2,5 м. Третичные отложения не содержат никаких ископаемых (Кучинский, 1950). Эти породы маломощны. Они, по-видимому, континентального происхождения (озерные и речные). Однако не исключено, что в южных районах Смоленщины имеются и морские осадки. Третичные, меловые и юрские отложения наклонены на запад в сторону оси Днепровско-Донской впадины (Погуляев, 1959).

Характерными породами антропогенной системы являются морены - валунные глины, красно-бурые и желто-бурые валунные суглинки и супеси, отложенные ледниками, флювиогляциальные пески, образовавшиеся при таянии ледников, озерно-ледниковые глины, суглинки и пески, возникшие в озерах, существовавших близ края ледника, речные (аллювиальные) отложения, представленные песчано-глинистыми породами, лессы, образовавшиеся за счет пыли, переносимой ветрами, озерные и болотные отложения — торф, мергели, пески, сапропели, отложения источников — известковые туфы. Мощность антропогенных отложений достигает 160 м (Природа Смоленской области, 1973).

Краевые ледниковые образования в виде кам и озв широко распространены, в частности, в Слободском районе. Там же много озер ледникового происхождения (Сапшо, Баклановское, Рытое и др.) (Погуляев, 1955а).

Национальный парк «Смоленское Поозерье» располагается на территории Ельшанско-Аржатского зандрово-моренного озерного района. По рельефу он делится на две половины: западу от р. Ельша располагается относительно повышенная холмистая моренная равнина с большими или меньшими участками зандровых понижений. Часто встречаются краевые ледниковые образования — озовые гряды и камовые холмы, сложенные песчано-гравийным материалом. В понижениях между холмами — озера ледникового происхождения. К востоку от Ельши лежит пониженная слабоволнистая зандровая равнина, местами сильно заболоченная. Встречаются участки с моренными и камовыми холмами и озовыми грядами. Высота отдельных холмов 200— 310 м. Озёра также ледниковые. У восточной границы района проходит древняя ложбина стока ледниковых вод, так называемая «Свитская долина», занятая торфяником (Погуляев, Шостьина, 1963).

Парк находится в пределах трех существенно различающихся ландшафтов. Основная его часть входит в пределы ландшафтов Слободской возвышенности и Ельшанско-Свитской низины, относящихся к зоне валдайского оледенения. Небольшая восточная его часть относится к ландшафту Духовщинской возвышенности, расположенном в зоне днепровского (московского) оледенения.

Представленные на данной территории ландшафты существенно отличаются между собой. В ландшафте Слободской возвышенности помимо типичных для зоны валдайского оледенения природных комплексов (волнистых моренных равнин, моренных холмов, камов и др.) представлены своеобразные природные комплексы краевой зоны оледенения - мощные озовые гряды, крупные песчаные холмы, образующие с глубокими котловинами и отдельными заболоченными низинами сложные природные системы. Образование их связано с особенностями деятельности ледника и его талых вод на данной территории.

В ландшафте Ельшанско-Свитской низины преобладают зандровые и озерно-ледниковые равнины. Своеобразием здесь отличаются придолинные зандры, представленные местами особыми комплексами бугристо-озовых образований. Особенно выделяются такими образованиями долины рек Василевки, Гобзы, Сермятки. В данном ландшафте хорошо сохранились многие торфяники, в том числе входящие в число наиболее крупных в области.

Ландшафт Духовщинской возвышенности включает ряд типичных для зоны днепровского оледенения природных комплексов — моренных равнин, перекрытых лессовидными суглинками; маломощными отложениями талых ледниковых вод. Заметно выделяются здесь в отдельных местах на склонах Духовщинской возвышенности ярко выраженная сеть эрозионных форм рельефа.

Отличительная особенность литогенной основы территории парка — значительная пестрота рельефа и покровных пород. В пределах рассматриваемой территории хорошо выделяется вторая полоса краевых образований валдайского ледника. Прослеживается она по линии пос. Пречистое — д. Воробьи — пос. Пржевальское — д. Бакланово и далее за пределы парка к Чеплинским озёрам (Шкаликов и др., 2005).

1.4. Гидрография

На территории Смоленской области имеется довольно густо развитая речная сеть, а на северо-западе значительное количество озер. Реки области имеют обычно ясно выраженные, довольно широкие долины, нередко с 1—2, реже 3-мя надпойменными террасами, иногда значительной ширины. Долины рек глубоко врезаются в слагающие территорию области породы, достигая нередко коренных иных отложений. Долины рек, а также овраги, оказываются главными местами, где происходит, с одной стороны, инфильтрация атмосферных вод и питание ими подземных водоносных горизонтов, с другой — разгрузка подземных вод. Но, в общем, реки, протекающие по территории области своими верховьями, являются в большей степени областями питания водоносных горизонтов. Река Западная Двина протекает в северо-западной части области. Длина ее в пределах области около 60 км. Главные притоки, протекающие в пределах области,— Ельша и Каспля с притоком Гобзой. Западная Двина прорезает своей долиной только четвертичные отложения, питаясь подземными водами подчиненных этим отложениям водоносных горизонтов. Отличительной особенностью бассейна Западной Двины служит наличие большого количества озер, приуроченных, обычно, к конечно моренным грядам. Главнейшими озерами являются: Щучье, Сапшо, Каспля. Озера связаны с системой Западной Двины и нередко служат истоками рек. Питаются озера ключами четвертичных водоносных горизонтов (Кучинский, 1950).

В области преобладают малые реки. Речная сеть ее густая и весьма разветвленная. Причина такого положения — в сложной геологической истории области, в ее расположении на стыке крупнейших геологических структур Русской

платформы, а также в том, что в четвертичное (антропогенное) время при многократном обледенении здесь возник сложный рельеф, по которому при таянии ледников воды их потекли в разные стороны, образовав глубокие желоба. Некоторые из этих желобов унаследованы современными реками (Погуляев, 1959).

Протяженность всех рек и речек Смоленской области составляет около 12 тыс. км. В области насчитывается 429 рек длиной свыше 10 км. Из них подавляющая часть не превышает в длину 10—15 км. Рек, протяженностью свыше 25 км, - около 80-ти. Вся речная сеть области принадлежит к трем бассейнам - Днепровскому, Волжскому и Западно-Двинскому (Климов, 1951). В верховьях рек или притоков на территории области образовался довольно сложный узел бассейнов (притоки больших рек в их верховьях часто сближаются на короткие расстояния — в 2—3 км), откуда воды рек текут в три моря — Балтийское, Черное и Каспийское. Поэтому направление течения рек разное: восточное и северное (реки бассейна р. Волги), южное (реки бассейна р. Днепра) и западное и северо-западное (реки бассейна р. Западной Двины).

Реки Смоленской области, даже малые, в большинстве имеют надпойменные террасы; аллювий их пойм часто достигает мощности 15—20 м, а иногда и больше. Уклон русел рек в верховьях в 5—6 раз больше, чем в их среднем и нижнем течении, что сказывается на большой разнице в скоростях течения на разных участках рек. Долины рек, особенно в восточной части области, как правило, глубокие (в Смоленске и Дорогобуже р. Днепр имеет долину глубиной 60—80 м); русла рек врезаются в пойму на 2—3 м или больше. Ширина долин рек разная: в верховьях небольшая, в среднем и нижнем течении достигает в отдельных местах 5 м (Алексеев, 1949).

Территория Национального парка относится к бассейну р. Западной Двины. Основная часть ее (около 80%) дренируется р. Ельшой — притоком Западной Двины третьего порядка. Юг данной территории и почти вся западная ее часть относится соответственно к бассейнам рек Гобзы и Половьи. Основные реки парка Ельша и Половья имеют связь с расположенными на его территории отдельными озерами, поэтому сток их в определенной степени зарегулирован.

В парке насчитывается 35 озер ледникового происхождения. Основная часть их относится к Пржевальской группе, насчитывающей около 20 озер. Котловины озёр имеют различное происхождение. Наиболее распространены котловины термокарстового происхождения, отличающиеся, как правило, неопределённой формой, значительной глубиной, неровным дном.

Большая часть озер парка приурочена к краевым образованиям ледника, но при этом они нередко различаются по генезису, гидрологическому и

гидрохимическому режимам. В этом отношении наиболее заметно выделяется крупная котловина в краевых образованиях Слободского ландшафта, в которой расположены озера Чистик, Большое и Малое Стречные, Мутное, Долгое, Глубокое и Круглое. Озера в котловине, за исключением трех последних, не связаны между собой протоками. Разделяют их крупные озовые гряды (Шкаликов и др., 2005).

1.5. Растительный мир

Смоленская область лежит в зоне умеренно-холодного климата (по В. Кёппену), который оказывает сильнейшее воздействие на видовой состав растительности. Наиболее важной в этом смысле чертой климата является морозная зима. Ее воздействие остро сказывается на тех растениях, у которых почки возобновления находятся высоко над землей (выше уровня снега). Это (по Раункиеру) фанерофиты, деревья и кустарники, более или менее крупные, с почками, доступные охлаждению и иссушающему действию зимних ветров. В лучшем положении будут мелкие кустарники и полукустарники, с почками возобновления выше уровня почвы, но не особенно высоко. Это так называемые «хамефиты». Их почки, обычно прикрытые снегом, менее подвергаются воздействию морозов, но в малоснежные зимы опасность создается и для них. В благоприятном положении будут гемикриптофиты — травы с почками возобновления на уровне почвы. Под слоем опавших листьев и снежным покровом эти растения даже в малоснежные зимы (все же защищены от холода и острые воздействия зимних морозов доходят до них в смягченном виде — замедленно и без колебаний, особенно вредных. В наилучшем положении находятся криптофиты с почками возобновления более или менее глубоко под землей. Это тоже травы, но с почками, глубоко скрытыми в клубнях, луковицах или же глубоко под водой и т. д.

Ботаник Г. И. Танфильев выделяет здесь область суходолов и смешанных лесов в отличие от лежащей к северу области болот и тайги, а к югу — степной области. Эта область суходолов и смешанных лесов, начинаясь на западе Европы, через Германию и Польшу вступает в пределы России очень широкой полосой - от южной Финляндии почти до Черного моря, и затем, постепенно сужаясь, доходит до Урала. Вместо полосы получается некоторое подобие клина. Этот клин в пределах области покрыт смешанным лесом, где породы широколиственные (дуб, клен, ясень, вяз, липа, клейкая ольха и сопровождающие их кустарники и травы) перемешаны с хвойными породами: елью, сосной, можжевельником и мелколиственными: березой бородавчатой, березой пушистой, осиной, рябиной, черемухой и другими.

Налицо, по крайней мере, две флоры: одна — широколиственная с набором древесных, кустарниковых и травянистых форм, идущих с запада, другая в составе ели и ее спутников — северного, происхождения. Эти две флоры смешиваются на фоне безразличных форм, не принадлежащих ни к одной из них и не ясных в смысле происхождения (Алексеев, 1949).

Основным типом леса северной части области является ельник-зеленомошник, представленный здесь своим главным типом — ельником-черничником, не имеющим большого распространения, и переходным от него ельником-кисличником, занимающим господствующее положение. Доминирующим растением здесь является кислица (*Oxalis acetosella*); кроме нее наиболее характерны черника, майник двулистный, седмичник европейский, костяника.

Ельник-кисличник, переходя при увеличении карбонатности материнской породы в сложный ельник, с другой стороны, при увеличении влажности в условиях плохого стока вод, переходит в ельник-долгомошник. Последний располагается на переходах, занятых ельником-кисличником, к пониженным, не имеющим стока местам на водоразделах; кроме того, его можно встретить и в замкнутых понижениях перехода к долинкам ручьев. В ельнике этого типа отмечается плохой рост ели, она вся бывает увешана лишайниками, сравнительно тонка. Травяной покров обычно состоит из хвоща лесного, брусники, осок, черники. Имеется сплошной покров из кукушкина льна.

Ещё одним типом леса, имеющим распространение в рассматриваемой части области, является ельник сфагновый, который развивается в замкнутых водораздельных понижениях, лишенных стока. Ель здесь очень корявая, имеется примесь сосны. Близкий уровень грунтовой воды приводит к появлению торфяного слоя. Травяной покров либо совершенно отсутствует, либо представлен болотными формами: багульником, голубикой, вереском болотным, осоками. Имеется сплошной моховой покров исключительно из сфагновых мхов. Сильное развитие имеют кочки, покрытые кукушкиным льном.

При дальнейшем нарастании влажности и развитии болотного процесса ельник сфагновый переходит в сосняк сфагновый; здесь, вследствие обилия влаги, ель уступает место сосне. Сосняк сфагновый далее переходит в сфагнум с сосной и, наконец, в чистый сфагнум. В этих последних типах сосна значительно угнетена. Очень редко попадает здесь примесь березы (единично встречается *Betula nana*) и ивы; травяной покров весьма незначителен и состоит только из болотных форм; встречаются клюква, морошка, росянка.

Увеличение влажности, отмеченное для перехода ельника-кисличника в долгомошник, может быть и иного типа: связанное не с застойной, но с проточной водой, что имеет место при переходе к долинам ручьев и рек. Здесь можно наблюдать переход ельника-кисличника в ельник травяной и затем в ельник приручевой. В обоих типах ельников имеется очень густой и разнообразный подлесок, состоящий из черемухи, крушины, жимолости.

Сосняки обычно приурочены к пескам и встречаются в Велижском, Пречистенском и Слободском районах более или менее значительными площадями, а в остальных районах — отдельными пятнами вдоль течения рек.

Поймы служат последним убежищем широколиственного (главным образом, дубового) леса, давно вытесненного с водоразделов еловыми формациями. Правда, эти дубравы здесь сильно засорены елью, но травяной покров состоит из растений, свойственных именно широколиственному, а не еловому лесу; здесь в большом количестве можно найти ландыш, сочевичник, перелеску (Кучинский, 1950).

Непосредственно на изучаемой территории национального парка среди коренных лесов преобладали, как и в остальных частях области, сложные ельники, широколиственные леса и разные типы сосняков. Коренные леса были вырублены в основном в прошлом столетии. Но, тем не менее, здесь лучше, чем где-либо на Смоленщине сохранились эталоны отдельных типов лесов, среди которых выделяется уникальный девственный массив елово-широколиственного леса площадью 359 га на севере парка.

В целом в парке преобладают насаждения лиственных пород. Господствуют среди них березняки, нередко осинники и черноольшанники. Среди хвойных пород преобладает ель (55%). Произрастает она в основном в смешанных насаждениях. Произрастают также сосновые леса. Особо выделяются в этом отношении боры озово-бугристых и холмистых комплексов возле озер Баклановское, Чистик, Махнач, Лошамье и др. Широколиственные леса (из дуба, вяза, ясеня) представлены небольшими фрагментами. В отдельных местах встречаются чистые липовые насаждения (липы чаще порослевые).

Территория парка заметно выделяется флористическим богатством. Здесь выявлено 850 видов сосудистых растений, в том числе 149 водных и прибрежно-водных растений (Шкаликов и др., 2005).

1.6. Почвенный покров

Растительный покров области представлен лесной формацией, покрывавшей в прошлом (до распахки) полностью всю ее территорию, и почвообразование здесь происходило под воздействием лесной и сопутствующей ей травянистой растительности. Особенности климата обусловили на территории области значительное преобладание осадков над испарением, вследствие чего почвообразование происходило (и происходит) при постоянном промывании почвообразующих пород нисходящим током атмосферных осадков и выщелачивании растворимых солей. Основными почвообразовательными процессами являются следующие: 1) дерновый, 2) подзолистый и 3) болотный. Первые два обязаны своим происхождением доминирующему воздействию растительного покрова, третий — влиянию грунтовых вод. Между этими тремя основными типами почвообразования существуют переходные: 1) дерново-подзолистый, 2) дерново-болотный и 3) подзолисто-болотный, которые при определенных условиях могут получать самостоятельное значение и занять господствующее место на той или иной территории (Кучинский, 1950).

Дерново-подзолистые почвы занимают в области около 83 % всей площади, подзолистые — 5%, подзолисто-болотные (дерново-подзолисто-глеевые) и болотные — до 9 %, аллювиальные и дерново-глеевые — не более 3%.

Подзолистые почвы формируются в густых хвойных лесах, преимущественно еловых, лишенных травяного покрова.

Для образования дерново-подзолистых почв нужна также травянистая растительность. Эти почвы занимают в области огромные площади, находящиеся под пашнями и смешанными лесами. В зависимости от степени выщелачивания, они подразделяются на дерново-слабоподзолистые, дерново-среднеподзолистые и дерново-сильноподзолистые. На степень подзолистости почв, помимо материнской породы, атмосферных осадков, степени окультуренности и др., влияет рельеф. Если дождевая или снеговая вода не имеет стока и почти вся просачивается в землю, почва будет сильно выщелочена. Поэтому дерново-слабо-подзолистые почвы большей частью приурочены к покатым склонам холмов, дерново-среднеподзолистые — к волнистым водораздельным равнинам и к верхним частям пологих склонов; более плоские междуречья и нижние части пологих склонов, как правило, заняты дерново-сильноподзолистыми почвами с высокой кислотностью.

Дерновые почвы развиты на лугах и не занимают особенно больших площадей.

Подзолисто-болотные (дерново-подзолисто-глеевые) и болотные почвы встречаются довольно часто в виде то больших, то меньших участков. Развиваются они

большей частью в понижениях (котловинах) в условиях временно избыточного увлажнения среди массивов дерново-подзолистых почв. По степени выраженности глеевого процесса различают дерново-подзолисто-глееватые и дерново-подзолисто-глеевые почвы.

При более продолжительном переувлажнении, когда разложение органических веществ замедляется, образуются торфянисто-подзолисто-глеевые (слой торфа до 15 см) и торфяно-подзолисто-глеевые (слой торфа от 15 до 30 см) почвы. Эти почвы занимают обычно окраины болот и другие понижения рельефа с травами и лесом, иногда с черноольшаниками.

Более глубокие понижения с постоянным увлажнением заняты торфяно-глеевыми почвами (со слоем торфа более 30 см) и торфяными почвами — торфяниками (со слоем торфа более 50 см). Эти почвы обычно располагаются на мохово-осоковых переходных и на моховых верховых болотах.

По долинам более крупных рек области—Днепра, Вопи, Хмости, Сожа, Хмары, Десны, Остра и многих других — в поймах залегают пойменные (аллювиальные) почвы. В прирусловых частях пойм, где происходит ежегодное отложение и размыв песчаных наносов, развиваются аллювиальные дерновые почвы; в притеррасных понижениях, куда полыми водами заносятся только тонкие отложения — аллювиальные иловато-болотные.

Кроме названных почв, в области встречаются: дерново-карбонатные, развитые на известковых туфах и других карбонатных породах. Эти почвы встречаются, главным образом, в северо-западных и в северо-восточных районах области (Поголяев, Шостына, 1963). Дерново-карбонатные почвы формируются под травянисто-луговыми и травянисто-лесными фитоценозами на песчано-глинистых породах, обогащенных карбонатами кальция. Дерновые почвы образуются под луговыми травостоями суходольного типа. Как малые, так и крупные участки таких лугов размещаются на склонах долин и балок, моренных гряд и озово-камовых комплексов (Маймусов, 1992). Дерново-подзолисто-палевые («палевые») почвы, называемые так за окраску верхней части почвенного профиля, развиваются на двучленных наносах (большей частью на песках, подстилаемых мореной). Эти почвы, кроме обычного подзолистого горизонта, имеют второй осветленный горизонт с явлениями оглеения, расположенный на контакте песков с мореной.

В западной половине рассматриваемого физико-географического района (Ельшанско-Аржатского зандрово-моренного озерного), занятой холмисто-моренной равниной, почвы преимущественно песчанисто-суглинистые дерново-

сильнопodzолистые, в меньшей степени дерново-среднеpodzолистые. Понижения между холмами заняты дерново-podzолисто-глеевыми и торфянисто-podzолисто-глеевыми почвами. На озовых грядах и камах встречаются грубопесчаные каменистые почвы разной степени опodzоленности.

В восточной пониженной половине, на зандровой равнине, почвы часто переувлажнены. Основной фон составляют полуболотные дерново-podzолисто-глеевые почвы. Лишь к участкам моренных и камовых холмов приурочены дерново-podzолистые почвы. Широкая Свитская долина, а также котловины озер Вервижского, Демьяновского и др. заняты торфяно-podzолистыми и торфяными почвами (Погуляев, Шостьина, 1963).

1.7. Экологическое состояние территории

Национальный парк находится достаточно далеко от крупных промышленных центров, здесь нет промышленных предприятий и крупных автомагистралей. Среди явных факторов антропогенного воздействия можно назвать сельское хозяйство и туризм.

Основу сельского хозяйства территории парка составляют несколько КФК, сельхозкооператив «Аграрник», образованные на базе совхозов. Все хозяйства расположены в Демидовской части парка. Товарность растениеводства низкая, как и качество производимого зерна, которое используется в основном на фураж.

Животноводство в зоне парка является типичным для Смоленской области и представлено экстенсивным скотоводством на собственных грубых и сочных кормах. Общее количество животноводческих ферм, начиная с 1992 года, уменьшилось более чем в 10 раз. На сегодняшний день в каждом хозяйстве насчитывается не более 1-2 ферм. Такими же темпами происходит сокращение поголовья скота, в среднем ежегодно на 10—20%.

Начиная с конца 60-х годов естественный ход развития озер нарушился. Начался процесс антропогенной эвтрофикации, обусловленной, прежде всего, интенсификацией сельскохозяйственного производства, выразившейся в широком использовании органоминеральных удобрений (в среднем 5-6 т/га органических, 1,5-2 ц/га минеральных удобрений и 1,5-1,7 кг/га пестицидов), развитием мелиорации сельхозугодий, строительством ферм по берегам водоёмов. При сравнительно большой распаханности водосборов (нередко 25—30%) с полей и животноводческих ферм в озёра стали попадать в обилии минеральные и органические удобрения, токсические примеси, биогенные элементы (в основном фосфор и азот), способствовавшие

повышению трофности. Этот мощный антропогенный пресс отразился на летнем цветении воды, уменьшении прозрачности, сокращении содержания кислорода, увеличении минерализации, особенно в таких озёрах, как Баклановское, Рытое, Петровское, Сапшо.

После создания парка на данной территории произошло заметное улучшение качества вод, уменьшились концентрации тяжёлых металлов, пестицидов, синтетических поверхностно-активных веществ (по материалам фондов Смоленской областной ветеринарной лаборатории, гидропоста на оз. Сапшо). Это улучшение связано как с ограничением ряда видов природопользования (запрещение применения ядохимикатов в сельском хозяйстве (правда, во многих крестьянских хозяйствах сохранились непригодные склады, где хранятся неиспользованные ранее ядохимикаты), распашки земель и рубки лесов в водоохранных зонах, прекращение сброса стоков с ферм в реки и ручьи), так и с общим кризисом сельского хозяйства. Это благоприятно отразилось на гидробионтах — в реках и озёрах вновь появились раки, снизилась интенсивность цветения воды, улучшился кислородный режим (Национальный парк "Смоленское Поозерье", 2006). Тем не менее, есть свидетельства того, что в настоящее время оз. Сапшо испытывает интенсивную антропогенную нагрузку, которая проявляется в увеличении содержания в воде аммонийного азота, БПК₅, появлении нефтепродуктов в водной массе, увеличении площади зарастания водоема (Летопись природы, 2015).

Источниками, оказывающими локальное воздействие на воздушный бассейн, являются местные котельные, особенно котельная в санатории им. Н. М. Пржевальского, работающая на мазуте, и ГРЭС в пос. Озерный, где используются природный газ и привозной торф.

Социально-экономическое состояние территории, где расположен национальный парк «Смоленское Поозерье», за последние 3 года характеризуется продолжающимся процессом депопуляции в сельской местности, сокращением объемов сельскохозяйственного производства и некоторым оживлением в сфере хозяйства рекреационного. Численность постоянного населения с 1998 г. сократилась более чем на 10%. Сокращение численности населения обусловлено его естественной убылью, характерной для всей области (Направления развития, 2002).

На территории парка расположены 6 баз отдыха, санаторий республиканского значения общей емкостью около 1 тыс. человек, гостевые дома на 0,5-0,6 тыс. человек. Большая часть баз отдыха и санаторий возникли до учреждения национального парка и расположены в пос. Пржевальское и его окрестностях. Единоновременно на

организованных парком стоянках для туристов (более чем 70 пикниковых и многодневных) может разместиться максимально 1000—1500 человек. Рекреационная емкость парка, рассчитанная по существующим нормам и не вызывающая деградации экосистем, а также психологического дискомфорта, составляет около 300 тыс. человек. Реальные же потоки оцениваются в 80-100 тыс. человек ежегодно, включая дачное население.

Процесс отмирания малых деревень сопровождается концентрацией местного населения в нескольких крупных поселках и деревнях, расположенных в наиболее рекреационно привлекательной местности. В период массового посещения парка туристами воздействие на таких участках на прилегающие природные комплексы усиливается.

Захламленность территории некоторых деревень и поселков (особенно пос. Пржевальское) может быть объяснена нерешенностью вопросов утилизации бытового мусора в населенных пунктах, что часто приводит к дополнительному выносу загрязняющих веществ с ливневыми водами.

Использование рыбных ресурсов всегда являлось одним из источников жизнеобеспечения местного населения. Озера парка также традиционно являются излюбленным местом для многих приезжих рыбаков. В последние годы регулярно проводятся специальные исследования по динамике и составу ихтиофауны парка. По их результатам и сообщениям местных жителей, наблюдается постепенное снижение уловов (Национальный парк "Смоленское Поозерье", 2006).

Отдельные вопросы, касающиеся улучшения экологического состояния данной территории, пока полностью не решены. К ним прежде всего следует отнести вопросы утилизации бытовых отходов в пос. Пржевальское, стоков с отдельных животноводческих ферм, снижения риска пожаров, борьбы с браконьерством, загрязнения территорий отдыхающими и др. (Шкаликов и др., 2005).

В 2014 и 2015 гг. на территории НП «Смоленское Поозерье» кафедрой экологической геологии проводились полевые работы по изучению геохимической и геоэкологической обстановки как водоёмов, так и водосборных территорий на основе проведения пробоотбора в основном поверхностного слоя почв (методом конверта по регулярной сети) и донных осадков с помощью ковша-дночерпателя с последующим их анализом на валовое содержание различных элементов (тяжёлых металлов и других).

В 2015 г. пробы донных осадков оз. Сапшо отбирались как в прибрежной зоне с глубины 1-2 м, так и на глубинах более 4 м с помощью ковша-дночерпателя. Анализ на гранулометрический состав проводился ситовым методом. По результатам

исследования было выделено 5 типов осадков по гранулометрическому составу (алевритистый песок, гравийный песок, гравийно-алевритистый песок, алевритистый песок и гравийно-песчаный алеврит), выявлена их плохая сортировка. С помощью портативного рентгено-флуоресцентного анализатора X-Spec были определены содержания Ca, Pb, V, Ti, Sr, Zr, Cr, Mn, Fe, Zn, Rb, Co. Был посчитан коэффициент суммарного загрязнения, в котором за фоновое значение бралась медиана выборки. Повышенные значения коэффициента наблюдались около крупных пляжей озера (на северном берегу) (Кононова и др., 2015)

Также было изучено влияние полигона бытовых отходов на почвы прилегающей к нему территории. Выявлено равномерное незначительное загрязнение вследствие, возможно, сжигания отходов ранее на полигоне (Подлипский, 2014).

1.8. Описание объекта исследований

Очертание озера напоминает трапецию, обращенную своей широкой стороной к юго-востоку, а узкой — к северу. Длина озера 3 км, ширина 1,25 км (в наиболее расширенном западном конце), площадь 304 га (Погуляев 1955а), объем воды порядка 22,19 млн. м³ (Летопись природы, 2015). Абсолютная высота уровня воды 181,9 м. Приток в озеро составляет 19,9 млн. м³, отток – 18,5 млн. м³, площадь водосбора – 84 км² (Национальный парк "Смоленское Поозерье", 2006).

Котловина оз. Сапшо сложного типа, рельеф дна неровный. На озере имеются 6 поросших лесом островов, общей площадью 16 га. Расположенные по продольной оси 4 острова разделяют Сапшо на две неравных части. Северная более глубоководная, максимальная глубина 18,6 м (по результатам батиметрической съёмки в 2014 г. максимальная глубина – 12,75 м (Летопись природы, 2015)), средняя – 7,3 м. Есть несколько крупных песчаных отмелей. Длина береговой линии 8,71 км. Всего на озере шесть островов, все они представляют собой песчаные холмы высотой 30—40 м, густо поросшие смешанным лесом с преобладанием сосны.

Северный берег на всем протяжении имеет крутые склоны высоких песчаных холмов. Вдоль западного берега, примыкая к самому урезу воды, протянулась длинная и высокая озовая гряда. Озеро окружено озовыми грядами и камами, которые сложены крупнозернистыми песками, гравием, многочисленными мелкими и более редкими крупными валунами кристаллических пород. Высота камовых холмов и бугров в среднем 40—50 м. Они вытянуты в направлении, близком к широтному, и имеют в длину 200—300 м. На юге в озеро впадает река Сапшанка, на северо-западе – Безымянный ручей, из северо-восточного угла озера вытекает р. Сапша, соединяющая

его с оз. Петраковским и входящая в систему Западной Двины. (Погуляев 1955а). Для оз. Сапшо характерны значительные колебания уровня воды. Резкий подъем уровня приходится на середину – вторую половину апреля. Обусловлено это тем, что в период весеннего половодья рекой Василёвкой в оз. Петраковское приносится столь значительное количество талых вод, что это становится причиной переполнения озерной чаши, и избыток воды из него начинает сбрасываться по р. Сапше в оз. Сапшо. При этом направление течения р. Сапши меняется на обратное. Озеро Сапшо в это время становится бессточным, подъем уровня в нем достигает 2,5 м. Продолжительность половодья составляет 1,5-2 месяца.

В водоеме обитает 21 вид рыб, среди которых наиболее многочисленны плотва, окунь, лещ, щука (неоднократно отмечались случаи поимки крупных щук, массой до 16 кг). Ранее многочисленный и имевший промысловое значение судак обыкновенный в настоящее время практически не встречается. Мала численность миноги ручьевой, жереха и язя. В многоводные годы случаются заходы чехони и голавля, однако стабильных популяций они не образуют.

На северном берегу озера расположен поселок Пржевальское (до 1964 г. село Слобода), в котором находятся администрация национального парка, дом-музей Н.М. Пржевальского, музей Партизанской Славы, санаторий им. Пржевальского. На северо-западном берегу – деревня Старый Двор. По западному берегу проходит экологическая тропа, здесь же оборудованы туристические стоянки (Летопись природы, 2015).

Глава 2. Методика исследований

2.1. Методика полевых исследований

Полевые исследования проводились с 9 по 11 августа 2016 года в рамках учебно-производственной практики, организованной кафедрой экологической геологии в национальном парке «Смоленское Поозерье». В процессе работы было отобрано 15 проб донных осадков с помощью ковша-дночерпателя в объёме приблизительно 800 мл в тканевые мешки, глубина озера измерена в 16 точках, в каждой из которых с помощью GPS-навигатора фиксировались координаты для дальнейшей обработки полученных данных в ГИС (рис. 3). В процессе отбора отмечались цвет, запах, структура осадков, наличие и характер включений.

Также отбирались пробы органов и тканей рыб (жабры, сердце, плавательный пузырь, филе и чешуя окуня) и моллюсков в прибрежной зоне. Пробу каждого типа помещали в полиэтиленовый пакет или стеклянную ёмкость и заливали формалином

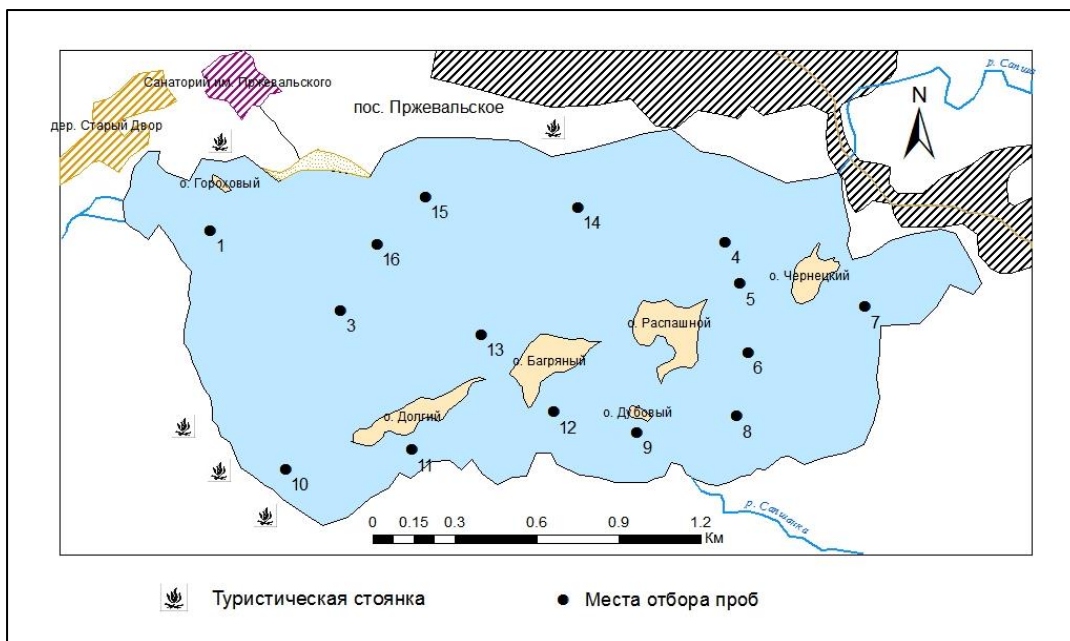


Рис. 3. Точки отбора проб донных осадков в 2016 г.

2.2. Методика лабораторного анализа донных осадков

Определение гранулометрического состава

Гранулометрический состав донных отложений определялся ситовым (для частиц крупнее 0,25 мм) и пипеточным методами (для частиц мельче 0,25 мм). В процессе пробоподготовки пробы высушивали до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 105°C, затем растирали в керамической ступке керамическим пестиком и просеивали через сито с диаметром ячеек 1 мм. Затем 10 г пробы заливались 10-15 мл пиррофосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) и растирались в керамической ступке пестиком с резиновым наконечником в течение 10 минут, после чего были отставлены на 30 минут. По истечении этого времени проба переносилась в пластиковый цилиндр сквозь сито диаметром 0,25 мм и заливалась дистиллированной водой до отметки 1 л. Фракция, оставшаяся на сите, выпаривалась, высушивалась и взвешивалась. Далее фракции определялись пипеточным методом, основанным на разной скорости осаждения частиц разного размера (Закон Стокса). Предварительно были определены коэффициент гигроскопичности и удельный вес. Время отстаивания пробы после взмучивания в течение 1 мин зависело от определяемой фракции и удельного веса пробы. Пипеткой отбирались 13 мл взвеси, выпариваемые затем на плитке и взвешиваемые. Так были определены фракции 0,25-0,05 мм, 0,05-0,01 мм, 0,01-0,005 мм и 0,005-0,001 мм; фракция частиц размером <0,001 мм высчитана путём вычитания доли остальных фракций из 100% (Опекунова и др., 2002).

Определение доли органического углерода

Содержание органических веществ определялось по методу Тюрина, основанном на окислении органического углерода с помощью дихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) в присутствии серной кислоты (H_2SO_4). К навеске пробы 0,045-0,076 г (в двукратной повторности) приливалось 10 мл хромовой смеси, затем пробу кипятили в течение 5 минут и остужали. После добавления нескольких капель фенилантраниловой кислоты пробу титровали 0,5 Н раствором соли Мора и на основе этого рассчитывали содержание органики по формуле $X = \frac{(a-b) \cdot 0.0006 \cdot k \cdot 100 \cdot K(H_2O)}{c}$, где а – объём соли Мора, ушедшей на титрование холостой пробы, b - объём соли Мора, ушедшей на титрование исследуемой пробы, с – навеска пробы, k - нормальность раствора соли Мора, K(H_2O) – коэффициент гигроскопии. Результат двух проб усреднялся (Опекунова и др., 2002).

Определение концентраций химических элементов в донных осадках и водной биоте

Для извлечения подвижных форм тяжёлых металлов (Fe, Ni, Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Mn) в пробах 2016 г. использовалась вытяжка ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8. Пробы были перетёрты в керамической ступке и просеяны через сито с диаметром ячеек 0,25 мм. Навеска пробы массой 2,5 г (в двукратной повторности) заливалась буфером в объёме 25 мл, смесь взбалтывалась 1 час и была отставлена. По истечении суток пробы профильтровывали сначала фильтром «белая лента», затем «синяя лента» и доводили дистиллированной водой до объёма 100 мл. Далее в учебной лаборатории физико-химического анализа ИНоЗ был проведён анализ содержания металлов (в мг/кг) с помощью атомно-абсорбционного спектрометра с пламенной атомизацией образцов novAA 300 (Analytik Jena). Результат двух проб усреднялся (Опекунова и др., 2002).

Валовое содержание элементов в пробах 2014-2015 гг. определялось предыдущими исследователями с помощью рентгено-флюоресцентного анализатора «Спектроскан Макс-G» в ресурсном центре СПбГУ «Геомодель». В 2014 г. состав были определены валовые содержания Ca, Pb, V, Ti, Sr, Zr, Cr, Mn, Fe, Zn, Rb и Co, в 2015 - K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Zr, Pb, Rb, Sr и I.

Пробоподготовка проб 2016 г. к анализу методом ICP-ES (M-02-902-157-10) на валовое содержание элементов, помимо перетирания и просеивания через сито с диаметром ячеек 0,25 мм, включала добавление к 0.2 г пробы (в двукратной повторности) следующих кислот: азотной (HNO_3) в объёме 6 мл, хлорной ($HClO_4$) – 2

мл и плавиковой (HF) – 4 мл с последующим разложением в микроволновой печи при температуре 200°C и 1.5 МПа в течение 15 минут. Затем растворы дважды фильтровались сквозь фильтр «синяя лента» и доводились до 100 мл деионизированной водой. Данные по валовому содержанию элементов (Fe, Ni, Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Mn, V и As) в пробах были получены с помощью оптического эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой ICPE-9000 в ресурсном центре по направлению «Химия».

Отобранные в 2015-2016 гг. органы рыб (окуня) и моллюски были проанализированы на содержание тяжёлых металлов по аналогичной методике.

2.3. Методика камеральной обработки материалов

Обработка данных в программе Statistica 10 включала в себя расчёт основных описательных характеристик (среднее арифметическое, максимум, минимум, стандартное отклонение, медиана), парных корреляций между параметрами, проведение факторного анализа.

В программе MS Office Excel проводился расчёт коэффициента суммарного загрязнения и обработка гранулометрического состава частиц: была рассчитана доля каждой фракции в пробе, что позволило дать название каждому типу осадков, сортировка донных осадков, а также построены кумулятивные кривые, с помощью которых определен средний размер частиц.

Программа ArcGIS 10.2.1 использовалась как для графического представления полевых данных и результатов расчётов, так и для выполнения пространственного анализа данных (например, расчёта морфометрических характеристик и корреляций распределения элементов в донных осадках в разные годы).

При создании карты глубин были учтены как данные с имеющейся готовой карты, так и результаты полевых измерений. Вначале был создан векторный файл озера в виде полигона, полученный путём векторизации спутникового снимка, предварительно привязанного по топографической карте. С помощью инструмента Polygon to raster была создана растровая маска озера для использования при дальнейшей интерполяции. Далее была проведена векторизация изобат по готовой карте (привязанному растру) в виде линий с приданием им значений глубин. При помощи инструмента Feature Vertices to Points эти линии были преобразованы в точки в узлах. Загруженные координаты точек пробоотбора с данными о глубине были добавлены к полученному из изобат слою точек с помощью инструмента Union. Далее была проведена интерполяция методом кригинга (Kriging) по созданной ранее маске.

Для создания изобат был использован инструмент Contour с указанием расстояния между изолиниями (в нашем случае 2 м). Для получения более хорошо читаемого изображения слишком мелкие элементы удалялись, а для сглаживания изолиний был применён инструмент Smooth line. Путём конвертации полученного растра в TIN в модуле ArcScene была создана 3D модель озера.

Для составления карты гранулометрического состава был создан векторный слой точек с данными о среднем размере частиц и известными координатами, отмеченными в полевых условиях с помощью GPS-навигатора. Реалистичное изображение грансостава было получено путём изменения изобат согласно среднему размеру частиц, определённого по 50 перцентилю. Получившийся слой линий был аналогично упомянутому выше методу преобразован в точки и проинтерполирован методом Kriging.

Карта распределения органического углерода создана с помощью усреднения приведённого к значениям органики растра гранулометрического состава и проинтерполированных методом IDW (обратных взвешенных расстояний) значений $C_{орг}$ в точках (Третьяков, Селезнев, 2008). Аналогичным образом построены карты распределения тяжёлых металлов в донных осадках.

Глава 3. Результаты исследования озера

Отобранные донные осадки в свежем состоянии имели тёмно-коричневый цвет, иногда с зеленоватым оттенком, наличие запаха не было отмечено. В некоторых пробах присутствовали включения органики в виде угля, коры, чешуек шишек, раковин моллюсков. Как видно по батиметрической карте (рис. 4), котловина озера имеет сложную форму, что объясняется её ледниковым происхождением. Четыре крупных острова, расположенных на одной оси, скорее всего, являются вершинами моренной гряды, северный склон которой более крутой, а южный - пологий. К северу от островов и между островами Распашной и Чернецкий находится глубоководная часть (8-12 м), разделённая небольшой перемычкой на две части, внутри которых не наблюдается резких перепадов глубин. К северу от острова Долгий находится вытянутая с севера на юг отмель, соединяющаяся с берегом. Северный склон озёрной котловины достаточно крутой, в то время как южный и восточный более пологи. Максимальная глубина (12,75 м) обнаружена к северу от острова Распашной.

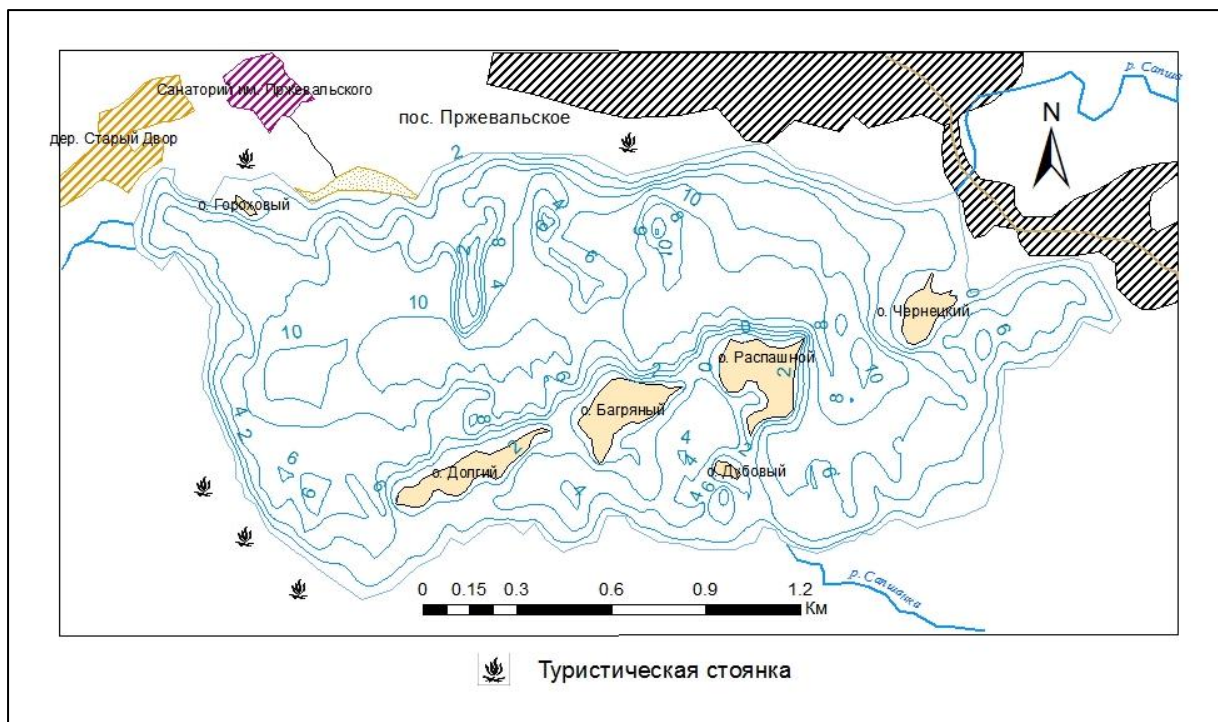


Рис. 4. Карта глубин озера. Изобаты проведены через 2 м

По данным батиметрической съёмки и полевым измерениям были рассчитаны некоторые морфометрические характеристики озера. Площадь зеркала озера равна 2,88 км², объём – 23 млн м³, длина береговой линии – 13,27 км, коэффициент развития береговой линии, рассчитанный как отношение длины береговой линии к длине окружности круга с площадью озера, равен 2,2. Также были найдены показатель удельного водосбора (площадь водосбора, делённая на площадь поверхности озера) – 29,2, показатель условного водообмена (результат деления объёма притока к объёму воды в озере) – 0,87 и удельная водообменность – обратная предыдущему показателю величина, выражающая число лет, в течение которых вся вода в озере сменится за счет притока с водосбора – 1,15 года.

3.1. Гранулометрический состав донных осадков и содержание органического углерода

В среднем по озеру заметно преобладание мелкообломочных отложений (фракции среднего и мелкого песка и крупного и мелкого алеврита составляют чуть более 50%). Также велика доля мелких пелитов (21%) (рис. 5).

Всего выделено 6 типов осадков по механическому составу: алевритовые пелиты, песчано-алевритовые пелиты, песчано-пелитовые алевриты, алевритовые пески, пелитовые пески и пески мелкозернистые (табл.1). Преобладают бигранулярные осадки, изредка встречаются миктиты (в точках 6, 12 и 15).

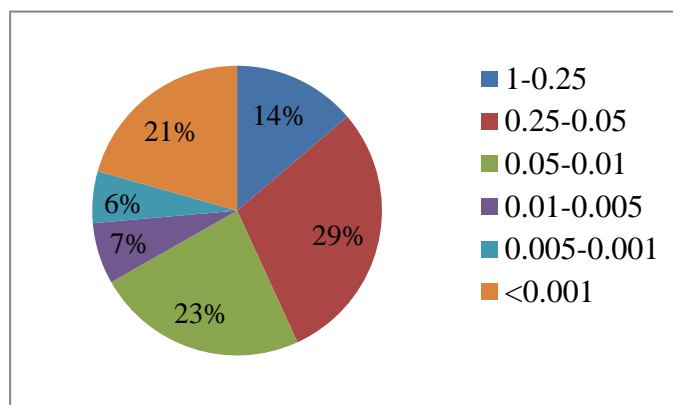


Рис. 5. Средний по озеру гранулометрический состав, мм

Таблица 1. Процентное содержание фракций в каждой пробе осадков

Номер пробы/ фракция (мм)	1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	Название	Сортировка
1	0.45	5.13	36.83	11.30	18.91	27.37	алевритовый пелит	Несорт.
3	0.18	9.64	36.18		25.50	28.50	алевритовый пелит	Плохо сорт.
4	37.16	29.81	16.01	3.23	5.54	8.24	алевритовый песок	Несорт.
5	0.32	3.59	36.05	11.76	19.22	29.06	алевритовый пелит	Несорт.
6	0.35	22.50	17.60	6.45	15.60	37.50	песчано-алевритовый пелит	Несорт.
7	8.11	64.60	6.99	3.84	5.61	10.84	пелитовый песок	Плохо сорт.
8	0.79	7.51	41.13	3.38	25.32	21.87	алевритовый пелит	Несорт.
9	0.49	12.63	34.40	5.69	17.01	29.78	алевритовый пелит	Плохо сорт.
10	0.02	83.51	4.00	6.70	0.62	5.16	песок мелкозернистый	Ум. сорт.
11	3.16	53.40	17.69		11.46	14.30	пелитовый песок	Плохо сорт.
12	1.23	12.67	45.66		21.04	19.41	песчано-пелитовый алеврит	Плохо сорт.
13	0.13	19.04	15.59	13.23	22.78	29.23	алевритовый пелит	Несорт.
15	13.77	29.39	23.62	6.85	5.77	20.62	песчано-алевритовый пелит	Абсол. несорт.
16	0.45	17.64	28.33	9.62	15.55	28.41	алевритовый пелит	Несорт.

Для графического отображения гранулометрического состава осадков были построены кумулятивные кривые: процентные значения каждой последующей фракции прибавлялись к предыдущей (рис. 6). Для определения среднего размера частиц для каждой пробы находились и усреднялись 16, 50 и 84 квантили, значения которых были предварительно переведены из шкалы Крамбейна в метрическую. Получившиеся значения (табл. 2) использовались для картирования гранулометрического состава. Далее для этого показателя будет использоваться обозначение М.

Таблица 2. Графическое значение среднего размера частиц

№ пробы	Средний размер частиц, мм
1	0.0036
3	0.0035
4	0.0412
5	0.0031
6	0.0031
7	0.0428
8	0.0051
9	0.0044
10	0.0965
11	0.0242
12	0.0080
13	0.0050
15	0.0176
16	0.0053

По виду кривой можно судить также о сортировке осадка: чем круче и ближе к прямой кривая, тем сортировка лучше (Романовский, 1977). Для нахождения 16 квантиля некоторых кривых была проведена экстраполяция с помощью уравнения логарифмической линии тренда.

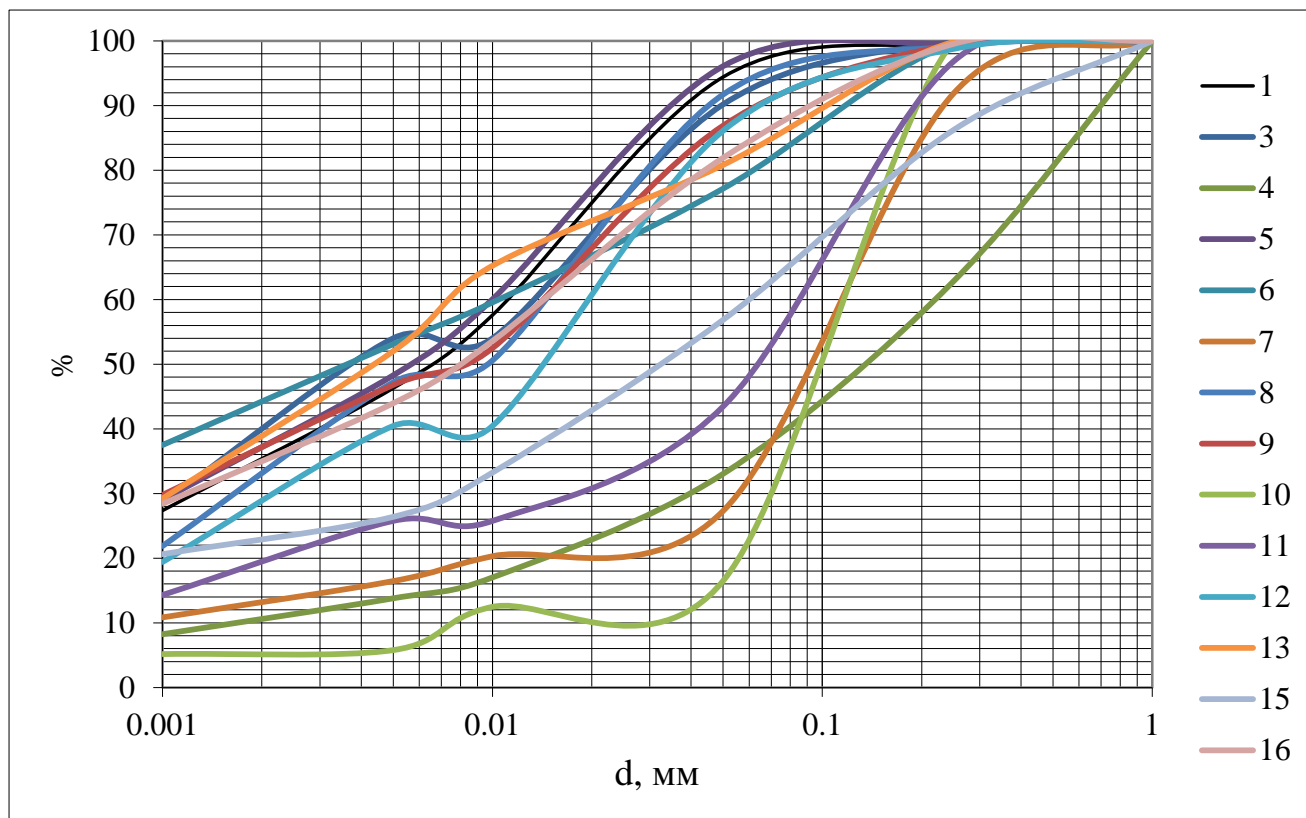


Рис. 6. Кумулятивные кривые

Для более точной оценки сортировки была посчитана энтропийная мера сортировки (табл. 3) по формуле $H_r = - \frac{\sum_{i=1}^n p \cdot \ln(p)}{\ln(n)}$, где p – содержание в долях единицы частиц фракции, n – число фракций (Романовский, 1977).

Таблица 3. Шкала отсортированности осадков

Энтропийная мера сортировки	Категория осадка
0,0-0,1	Идеально сортированный
0,11-0,25	Хорошо сортированный
0,26-0,50	Умеренно сортированный
0,51-0,75	Плохо сортированный
0,76-0,90	Несортированный
0,91-1,0	Абсолютно не сортированный

В среднем по озеру сортировка равна 0,77, это означает, что осадки плохо сортированные. Наблюдается высокая отрицательная корреляция (-0.94) между мерой сортировки и размером частиц – чем крупнее осадок, тем лучше он сортирован.

Распределение частиц по размеру в целом согласуется с глубиной – с её увеличением средний размер частиц осадков уменьшается (рис.7). Заметно преобладание песков и крупного алеврита (до 83%) в пробах, отобранных в нескольких метрах от берега (7, 10, 15) и вокруг островов, в то время как в пробах центральной части озера (3, 13) и на глубоких участках (более 4.5 м) между островами и берегом (5, 6, 8) пелитовая фракция достигает 50-60%. Видимые отклонения от этой тенденции на некоторых участках связаны с недостаточно равномерной сетью пробоотбора и малым количеством точек.

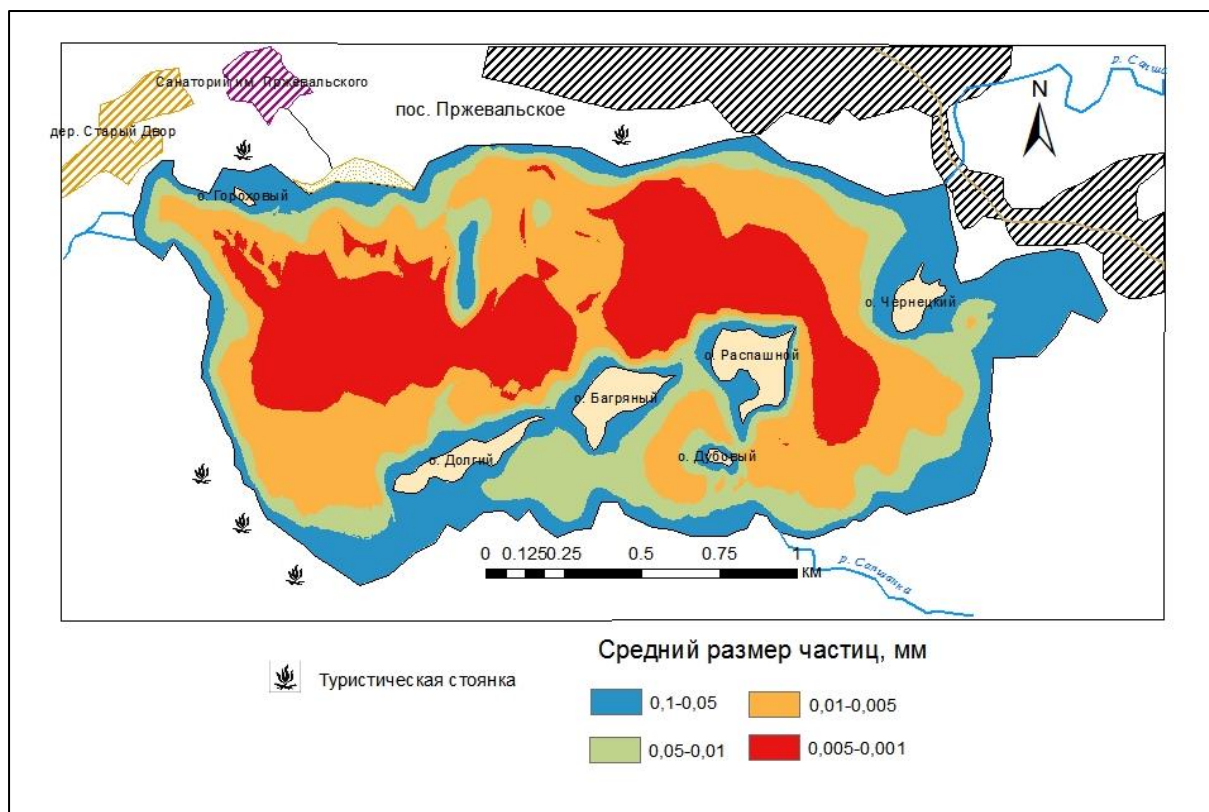


Рис. 7. Карта-схема гранулометрического состава донных осадков

Донные осадки озера, как видно из табл., содержат достаточно большие количества органического углерода - до 14,23% (табл.4, рис 8). Явно можно выделить две группы осадков: с содержанием органики 6,6% и менее (пробы 4, 6, 7 и 10) и более 11.51% (все остальные). Осадки, содержащие в себе большие количества органики, были отобраны в центральной части озера и к югу от островов, а бедные органикой – в основном в восточной части, а также на юго-западе (в относительно мелководных областях). При этом наблюдается отрицательная корреляция со средним размером частиц осадков (-0,69) и крупными фракциями – 1-0,25 мм (-0,52) и 0.25-0.05 мм (-0,79); с долей же мелких фракций связь положительна (0,81 с фракциями 0,05-0,01 мм и 0,005-0,001 мм, 0,68 с фракцией <0,001 мм), что объясняется высокой гидравлической

крупностью (способностью быстро осаждаться на дно) и большим удельным весом частиц органики. Явной связи с глубиной отбора проб нет, высокие содержания органики достаточно равномерно распределены по дну, лишь между близко расположенными точками 4 и 5 разница достаточно велика (3,7 и 13,3 соответственно), что можно объяснить разным расположением (точка 4 расположена на склоне озёрной котловины, а 5 – в понижении), и, как следствие, условиями осадконакопления и гранулометрическим составом (в точке 4 алевритовый песок, в точке 5 – алевритовый пелит).

В целом столь высокие концентрации органики в донных осадках говорят о несколько застойном режиме водоёма и возможной его эвтрофикации.

Таблица 4. Содержание $C_{орг}$ в пробах донных осадков

N пробы	Содержание $C_{орг}$, %
1	13.86
3	13.27
4	3.68
5	13.3
6	6.6
7	3.73
8	13.83
9	13.93
10	4.36
11	13.81
12	12.43
13	14.23
15	11.51
16	12.58

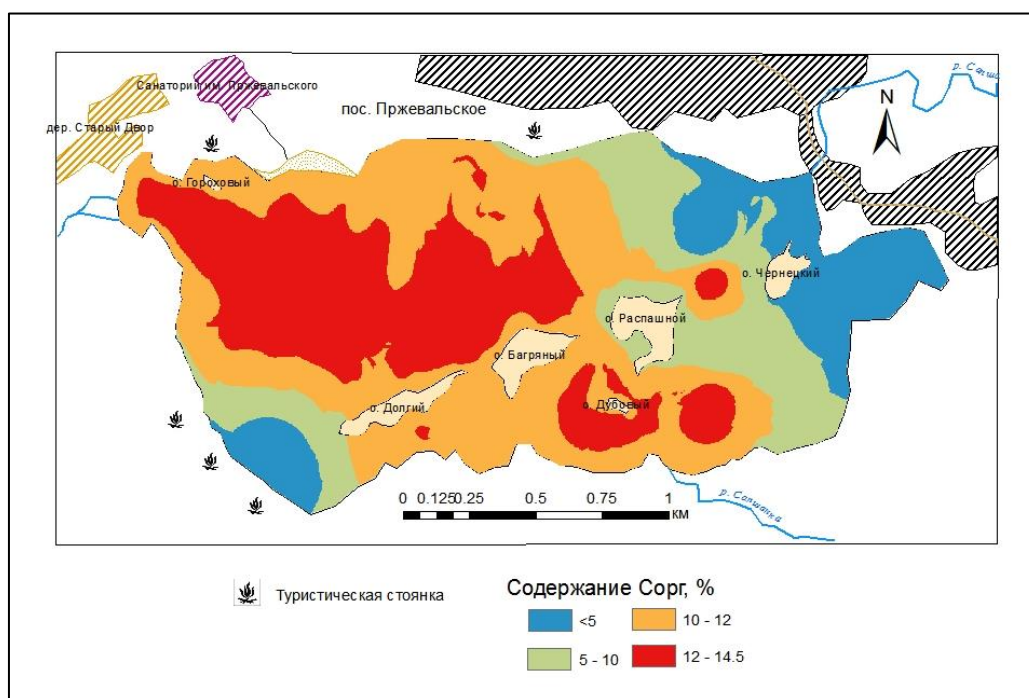


Рис. 8. Распределение $C_{орг}$ в донных осадках

3.2. Анализ показателей воды за предыдущие годы исследований

С 2008 по 2015 гг. ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН» проводил изучение содержания различных компонентов в разных средах (воде, воздухе, почвах) на территории НП «Смоленское Поозерье» с целью выявить степень загрязнённости территории. В рамках исследования озера Сапшо раз в сезон отбирались пробы воды с глубин 0,5 м и 6,5 м. Подробные результаты анализа проб воды вошли в состав ежегодных летописей природы (Летопись природы, 2013-2016). Приведённые ниже данные часто будут усреднены. Данное озеро относится к водоёмам рыбохозяйственного назначения, поэтому далее все показатели будут сравниваться с ПДК_{рыбхоз} (для всех показателей была рассчитана кратность превышения ПДК: $\frac{C_i}{\text{ПДК}_{\text{рыбхоз}}}$). Приведём здесь некоторые данные, отражающие состояние воды в предыдущие годы исследований.

В 2008 г. определялись концентрации Hg, Pb, Cd, Cu, а также α -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, ДДЕ, ДДД, ДДТ, 3,4-бенз-а-пирена и 1,12-бензперилена. Кратность превышения ПДК по Cu составила 2,2, концентрации же остальных элементов остались в пределах норматива. Тем не менее, наличие в воде пестицидов в концентрациях порядка нескольких нг/л (а в случае ДДТ она составила 24,4 нг/л) говорит об остаточном загрязнении в результате стоков с полей в те времена, когда на площади водосбора озера велась более активная хозяйственная деятельность. В последующие годы концентрации пестицидов, продуктов их метаболизма и ПАУ несколько колебались в пределах нормативов.

Результаты анализа проб воды в 2010 г. показали превышение ПДК для нескольких параметров и элементов (рис. 9)

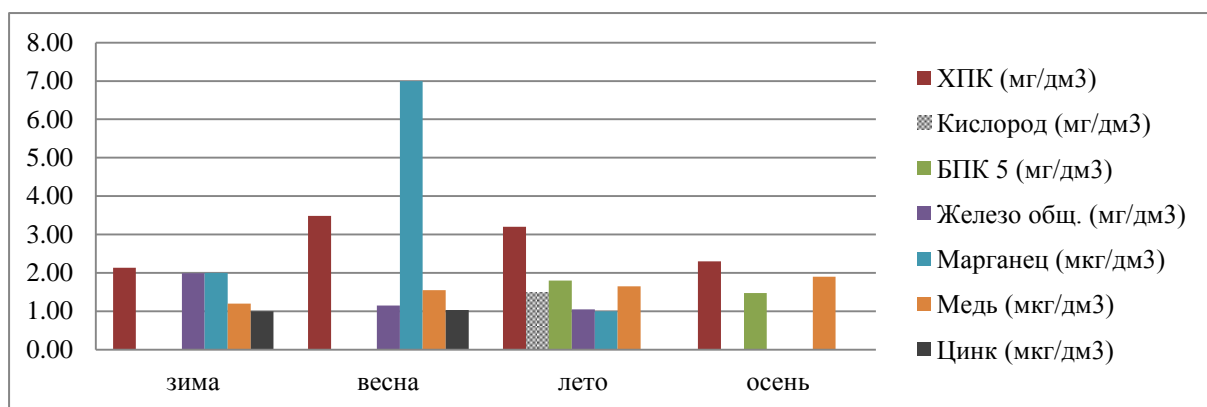
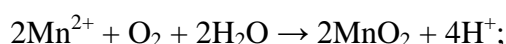


Рис. 9. Кратность превышения ПДК в 2010 г.

Показатель ХПК (химическое потребление кислорода) равномерно превышен в течение всего года (в среднем в 2.5 раза). Это указывает на лёгкую эвтрофикацию водоёма. Летом и осенью показатель БПК₅ (биологическое потребление кислорода за 5 суток) был незначительно больше нормы, а насыщение глубинных слоёв кислородом составило всего 4% при норме в 35%, что также свидетельствует об эвтрофикации.

Концентрация Fe максимальна зимой (0,22 мг/л), а к осени опускается до сотых мг/л, аналогичен ход содержания Zn (1 ПДК зимой и весной), что возможно связано с деятельностью планктона и переводу элементов в неподвижную форму. Железо попадает в озеро естественным путём с грунтовыми и поверхностными водами вследствие выщелачивания грунтов и находится в водах в виде окисных и закисных форм. Содержание Cu составляет примерно 1 ПДК в течение года, что также обуславливается геохимическими особенностями данной территории.

Столь высокие содержания Mn в воде объясняются высокими естественными концентрациями этого элемента в данной геохимической провинции и никак не могут быть признаком антропогенного загрязнения. Сильные колебания концентраций в течение года (от 5 мкг/л осенью до 70 мкг/л весной при ПДК 10 мкг/л) вызваны сезонными изменениями окислительно-восстановительной обстановки и концентрации растворённого кислорода в водоёме, а также деятельностью биоты. В верхнем слое донных осадков Mn (IV) восстанавливается с помощью бактерий до растворимого в воде Mn (II) и движется вверх за счёт диффузии, затем окисляется и выпадает в осадок. Цикл миграции Mn можно обобщённо представить в следующем виде:



В 2012 г. (рис. 10) Mn также лидирует по превышению ПДК (почти достигая 30-кратных концентраций летом и осенью). Высокие осенние концентрации можно объяснить сдвигом активности биоты на более позднее время.

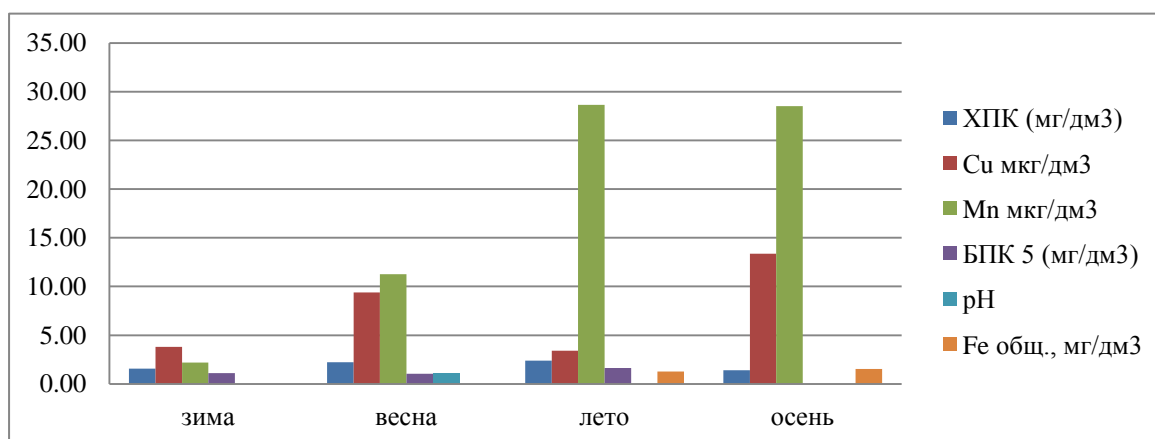


Рис.10. Кратность превышения ПДК в 2012 г.

По-прежнему немного превышены показатели ХПК и БПК₅, указывающие на эвтрофицированность. Весной наблюдается увеличение рН до 9.1, что несколько выше ПДК. Это объясняется превышением активности фотосинтеза над дыханием фитопланктона в озере, и как следствие, уменьшением концентрации углекислого газа и угольной кислоты.

В 2013 г. (рис. 11) впервые превысили нормативные концентрации такие показатели как N (NO₂⁻) (в глубинных водах) и содержание нефтепродуктов (летом). Увеличение азота нитритов на глубине может быть признаком свежего загрязнения после туристического сезона, обнаружение нефтепродуктов говорит об увеличении антропогенной нагрузки на объект в летнее время (возможно, использование моторных лодок). Превышение концентраций Mn также сохраняется, при этом максимальная кратность наблюдается летом (около 32).

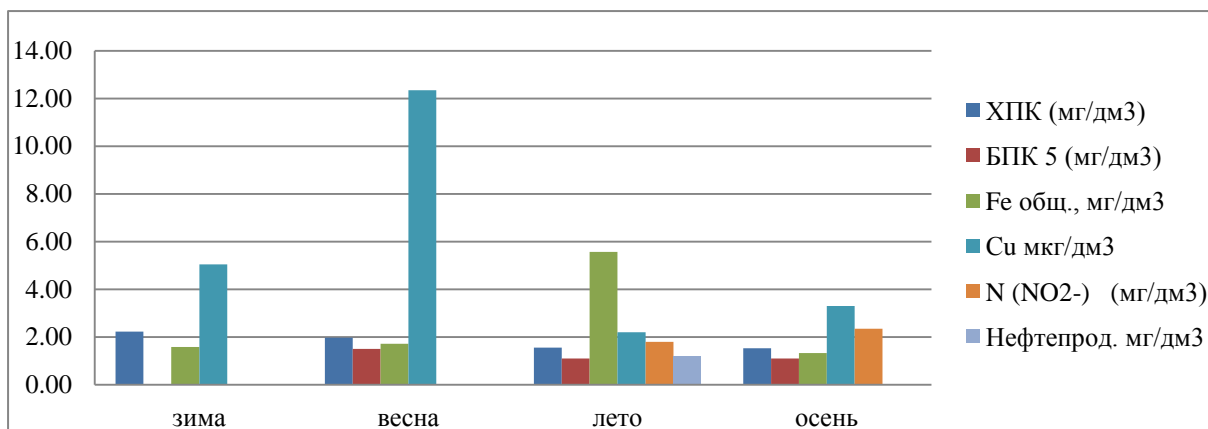


Рис. 11. Кратность превышения ПДК в 2013 г.

В следующем году ситуация была схожей (рис. 12), но впервые замечено превышение ПДК по фенолам (весной и летом), что свидетельствует о биогенном загрязнении, источником которого являлась гниющая прошлогодняя растительность, попавшие в воду древесные остатки и опавшая прошлогодняя листва. Отмечено также 9-кратное превышение ПДК для Fe летом. Высокие концентрации нефтепродуктов в этом году наблюдаются зимой, а не летом, скорее всего это остаточное загрязнение, не переработанное биотой.

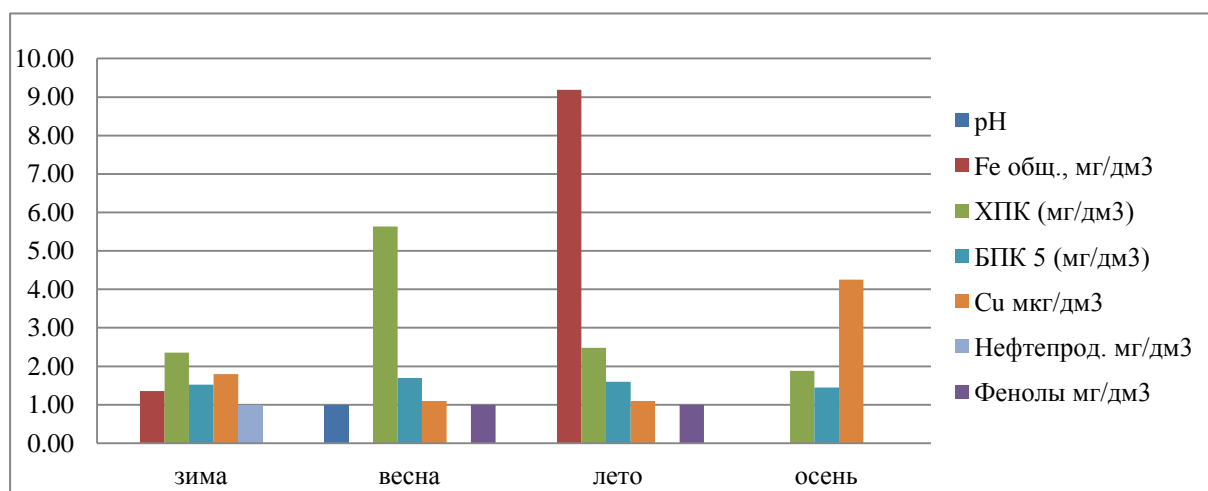


Рис. 12. Кратность превышения ПДК в 2014 г.

В 2015 г. (рис. 13) наблюдаются рекордные превышения Cu над нормативом: зимой кратность равна 14, к лету непрерывно падает до 4. Возможно, это отражение локального загрязнения выше по течению в каком-либо водотоке, впадающем в озеро, и осаждения металла на дно со временем. В этом году в августе впервые наблюдалось небольшое превышение ПДК по аммонийному азоту - N (NH_4^+), что говорит о свежем загрязнении и близости его источника (например, сточные воды посёлка). Загрязнение фенолами не только сохраняется, но усиливается – теперь норматив превышает в течение всего года.

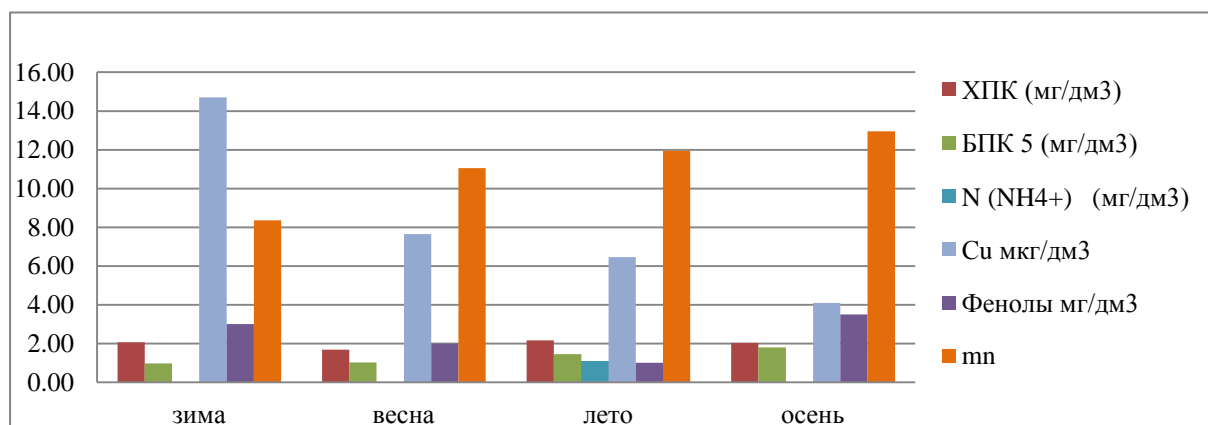


Рис. 13. Кратность превышения ПДК в 2015 г.

Анализ результатов проведённых ранее исследований позволяет ранжировать параметры по кратности превышения ПДК (рис. 14). Из всех параметров и веществ высокие концентрации обусловлены антропогенным влиянием лишь для некоторых – нефтепродуктов, иона аммония и азота нитритов.

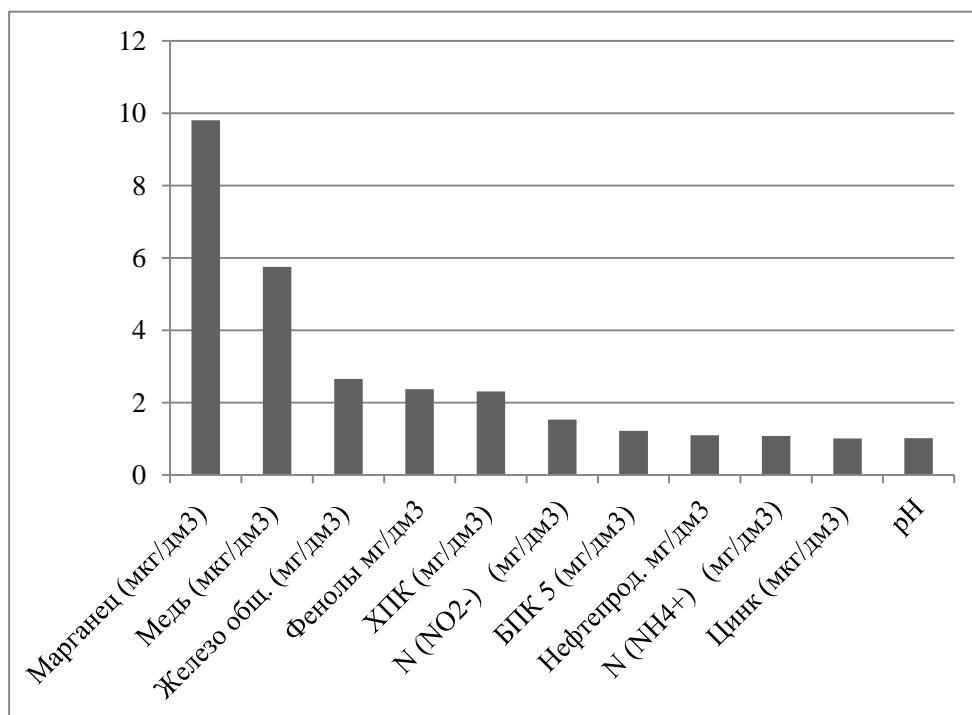


Рис. 14. Ряд показателей по кратности превышения ПДК

Можно также проследить изменение концентраций элементов с наибольшим превышением ПДК с 2012 по 2015 гг. в поверхностном слое воды и на глубине (рис. 15-16).

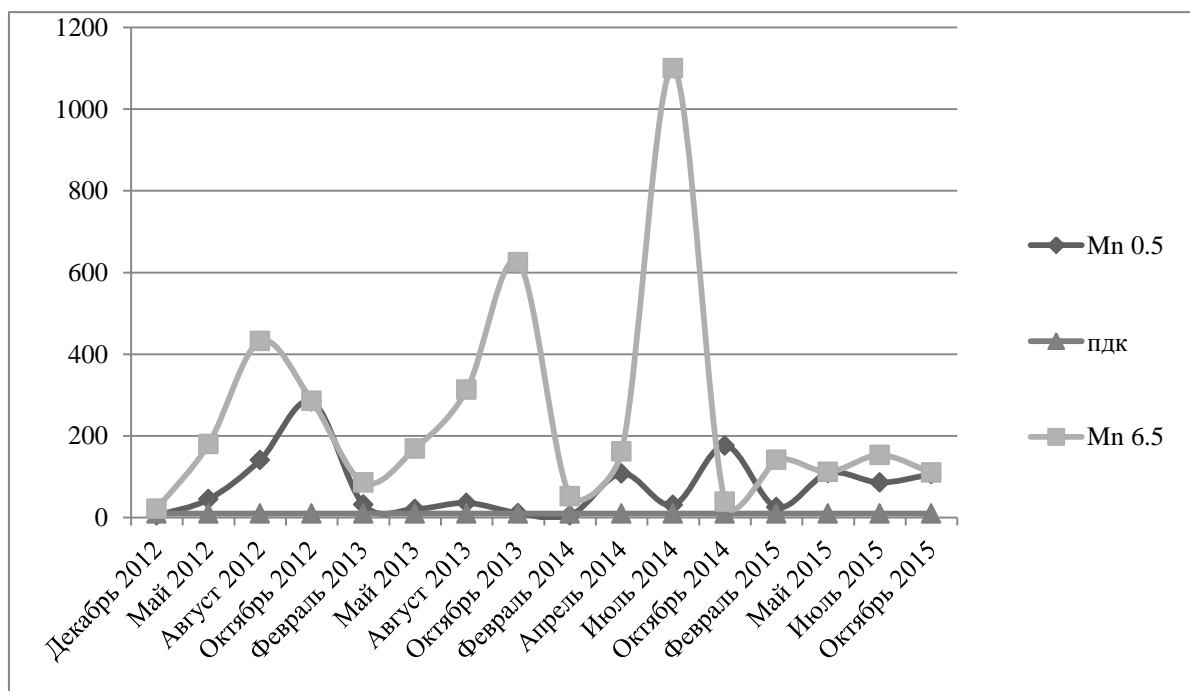


Рис. 15. Изменение концентраций Mn (мкг/л) во времени

Колебания содержания элемента в глубоких слоях явно носят сезонный характер, притом в последнее время они минимальны; концентрации там намного больше, чем в поверхностной воде, что говорит о поступлении элемента непосредственно из донных отложений и невысокой миграционной способности в условиях данного озера. В поверхностной воде изменения концентраций в 2012-2013 гг. повторяют ход глубинных вод, а в 2014-2015 гг. меняют фазу колебаний. Возможно, это связано с деятельностью биоты.

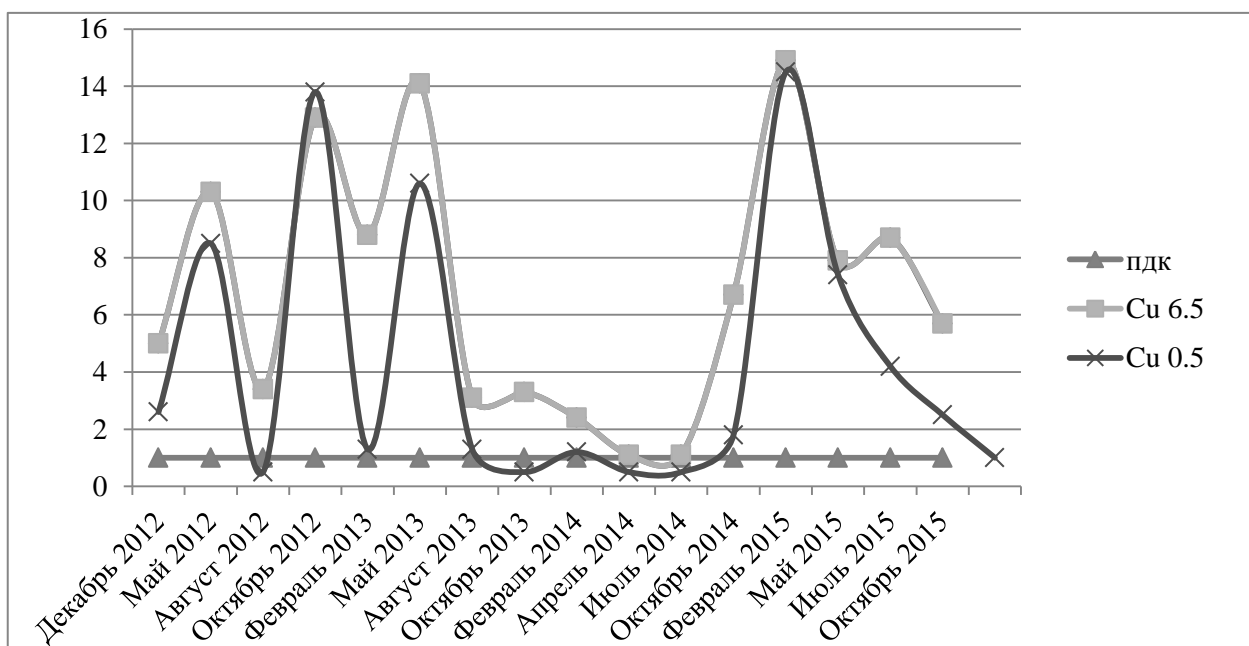


Рис. 16. Изменение концентраций Cu (мкг/л) во времени

Содержания Cu в глубинных слоях незначительно больше, чем в поверхностных, при этом концентрации изменяются одинаково в течение года, значит, элемент свободно мигрирует по всей толще воды. В 2012-2013 гг. виден сезонный характер колебаний концентраций (максимумы в мае и октябре), затем ход нарушается.

Изучение ионного состава озера позволило отнести его к гидрокарбонатному типу с преобладающим HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} составом (воды магниевые-кальциевые гидрокарбонатные).

По жёсткости воды озера относятся к типу умеренно жёстких вод (4-8 мг-экв/л.). Общая жесткость оз. Савш по данным 2015 г. в течение года изменялась от 1,99 ммоль/дм³ до 3,55 ммоль/дм³.

Для характеристики комплексного состояния воды в озере был рассчитан индекс загрязнения воды (ИЗВ) по формуле

$$\text{ИЗВ} = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{Ci}{\text{пдк}_i}}{6}$$

Для расчёта брались средние значения за 2010-2015 гг. Среди 4 показателей, наиболее сильно превысивших ПДК, оказались Mn, Cu, Fe и фенолы. Значение ИЗВ равно 3,8, что соответствует загрязнённой воде (табл. 5)

Таблица 5. Шкала соответствия значений ИЗВ и степени загрязнения воды (пресной)

Характеристика загрязнения	Значение ИЗВ
Очень чистая вода	менее 0,3
Чистая вода	0,3–1,0
Умеренно загрязненная вода	1,0–2,5
Загрязненная вода	2,5–4,0
Грязная вода	4,0–6,0
Очень грязная вода	6,0–10,0
Чрезвычайно грязная вода	более 10,0

Тем не менее, как уже было упомянуто, высокие содержания металлов, как минимум Mn и Fe, обусловлены естественными процессами, а не загрязнением, что является следствием отсутствия учёта географической дифференциации существующим нормативами.

Анализ концентраций тяжёлых металлов в водной биоте

Для изучения состояния водного объекта рыбохозяйственного назначения необходимым моментом является определение концентрации тяжёлых металлов именно в биоте, обитающей в озере – моллюсках и окуне (табл. 6). Все элементы концентрируются по-разному не только в разных средах, но и в разных органах одного организма, поэтому были приготовлены препараты, состоящие из органов разных особей окуня.

Сравнение с концентрациями тяжёлых металлов в гидробионтах других озёр национального парка даёт следующие результаты: в моллюсках содержание Cu на порядок больше, чем в оз. Рытое и Чистик, остальные элементы находятся на том же уровне или немного больше. Содержание всех металлов в оз. Сапшо в жабрах окуня выше, чем в соседних озёрах Лошамье, Рытое и Баклановское. Концентрации Fe и Zn в сердце и мышцах рыб на несколько десятков больше, чем в остальных озёрах, остальные элементы отличаются незначительно. В других тканях сильных различий в концентрациях не замечено.

Таблица 6. Концентрации тяжёлых металлов в органах и тканях рыб и моллюсков, мг/кг

Место пробоотбора	Тип пробы	Fe	Mn	Ni	Cr	Co	Zn	Cu	Pb	Cd
р.Сапша	моллюск, тело	333	275	0,5	0.9	0,5	121	18	5.6	0.37
оз. Сапшо о.Долгий		338	473	0,5	0.5	0,5	98	45	4.6	0.17
оз. Сапшо о.Распашной		342	378	0,5	1.1	0,5	122	21	6.8	0.45
оз. Сапшо СЗ пляж		203	523	0,5	0.4	0,5	125	19	5.2	0.37
оз. Сапшо	окунь жабры	120	6.4	3.4	44.6	2.1	181	1.9	9.1	1.40
оз. Сапшо	окунь сердце	256	2.2	1.6	6.4	1.2	146	19	0,5	0.10
оз. Сапшо	окунь плав. пузырь	47	2.0	1.4	10.1	1.2	92	2	3.2	0.40
оз. Сапшо	окунь филе (мясо, кости)	95	1.3	2.5	6.2	1.5	74	2.8	1.3	0.20
оз. Сапшо	окунь чешуя	89	3.7	0.6	35.5	1.4	59	6.1	1.9	0,5

3.3. Анализ пространственного распределения валового содержания элементов в донных осадках в 2014-2015 гг.

В 2014 г. пробы донных отложений (31 штука) отбирались в основном по периметру озера, поэтому сеть отбора неравномерна (рис. 17).

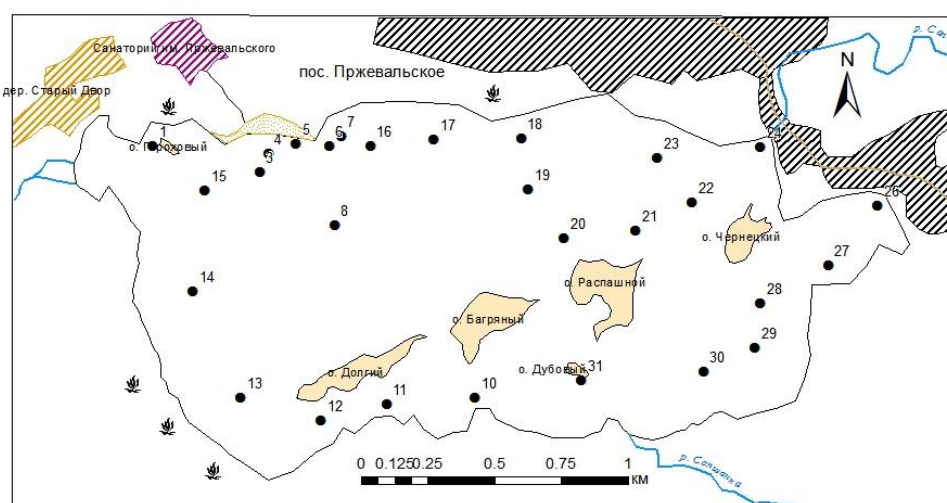


Рис. 17. Карта-схема пробоотбора в 2014 г.

Анализ таблицы парных корреляций (табл. 7) выявил деление элементов на группы. Co, Fe и Mn составили группу сидерофильных элементов, максимальные количества которых вытянулись в виде полосы с севера на юг через самую глубокую часть озера. При этом Mn сильнее всего коррелирует с глубиной (0.34), в отличие от Fe и Co, самые высокие содержания которых наблюдаются в южной части озера около о. Багрный. Pb, Zn и V мигрируют вместе как халькофилы и накапливаются в больших количествах как на востоке центральной части озера, так и около берегов, минимальные же значения отмечены в осадках, взятых на отмели напротив санатория и между о. Долгий и берегом. Cr, Zr и Ti также образуют ассоциацию элементов, достаточно равномерно распространённых на дне, но имеющих явный максимум в одной точке – 22, находящейся на северо-востоке озера. Это может быть обусловлено локальной неоднородностью химического состава осадков. Zr имеет достаточно сильную отрицательную связь с сидерофилами, а также Zn и Pb. Sr положительно коррелирует с одним элементом - Ca. Их максимальные концентрации обнаружены в точке 12 и убывают к северу и востоку от неё.

Таблица 7. Парные корреляции для валовых содержаний элементов в 2014 г.

Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Zn	Zr	Pb	Rb	Sr	
	-0.03	-0.40	0.02	0.07	-0.13	-0.14	-0.16	0.04	-0.16	0.07	0.81	Ca
		0.23	0.71	-0.18	-0.13	-0.10	0.02	0.31	0.06	0.10	-0.05	Ti
			0.11	0.26	0.42	0.43	0.65	-0.42	0.73	0.26	-0.68	V
				-0.31	-0.23	-0.21	-0.25	0.62	-0.15	-0.03	-0.18	Cr
					0.86	0.84	0.51	-0.53	0.50	-0.36	0.05	Mn
						0.99	0.68	-0.60	0.59	-0.33	-0.21	Fe
							0.71	-0.61	0.62	-0.29	-0.23	Co
								-0.76	0.85	0.31	-0.36	Zn
									-0.71	-0.19	0.07	Zr
										0.31	-0.38	Pb
											-0.15	Rb
												Sr

С использованием карты гранулометрического состава, созданной по результатам анализа проб 2016 г., был определён грансостав и в точках 2014-2015 гг. В отличие от металлов в подвижных формах, тесная связь с гранулометрическим

составом не обнаружена (максимальные значения коэффициентов корреляции 0,28 для Ca и 0,2 для Sr). Это может объясняться невысокой точностью интерполяции и разными методами химического анализа.

Для комплексной оценки степени концентрации металлов в донных осадках озера был рассчитан показатель суммарного загрязнения по формуле

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\text{фон}}} - (n - 1).$$

При этом за фоновые значения были взяты средние арифметические концентраций, за исключением превышавших сумму среднего и удвоенного стандартного отклонения ряда значений. Получившееся значение сопоставлялось со шкалой (табл. 8) для определения степени загрязнения.

Таблица 8. Шкала показателя суммарной оценки загрязнения для донных осадков (по Янину Е. П.)

Z_c	Уровень загрязнения
<10	Низкий
10-30	Средний
30-100	Высокий
100-300	Очень высокий
>300	Чрезвычайно высокий

Значения показателя получились ожидаемо низкими (среднее – 9.86) (рис. 18, табл. 9), тем не менее, в отдельных точках превышали 10 (нижний порог, означающий средний уровень загрязнения). Максимальное же значение в точке 12 составило 18,5, где основной вклад внесло высокое содержание Sr (691,5 мг/кг и 8-кратное превышение фонового значения) и Ca (106486 мг/кг и превышение фона почти в 5 раз), возможно, в этом месте находится локальная геохимическая аномалия. Высокие значения в точках 22-23 можно объяснить близостью посёлка.

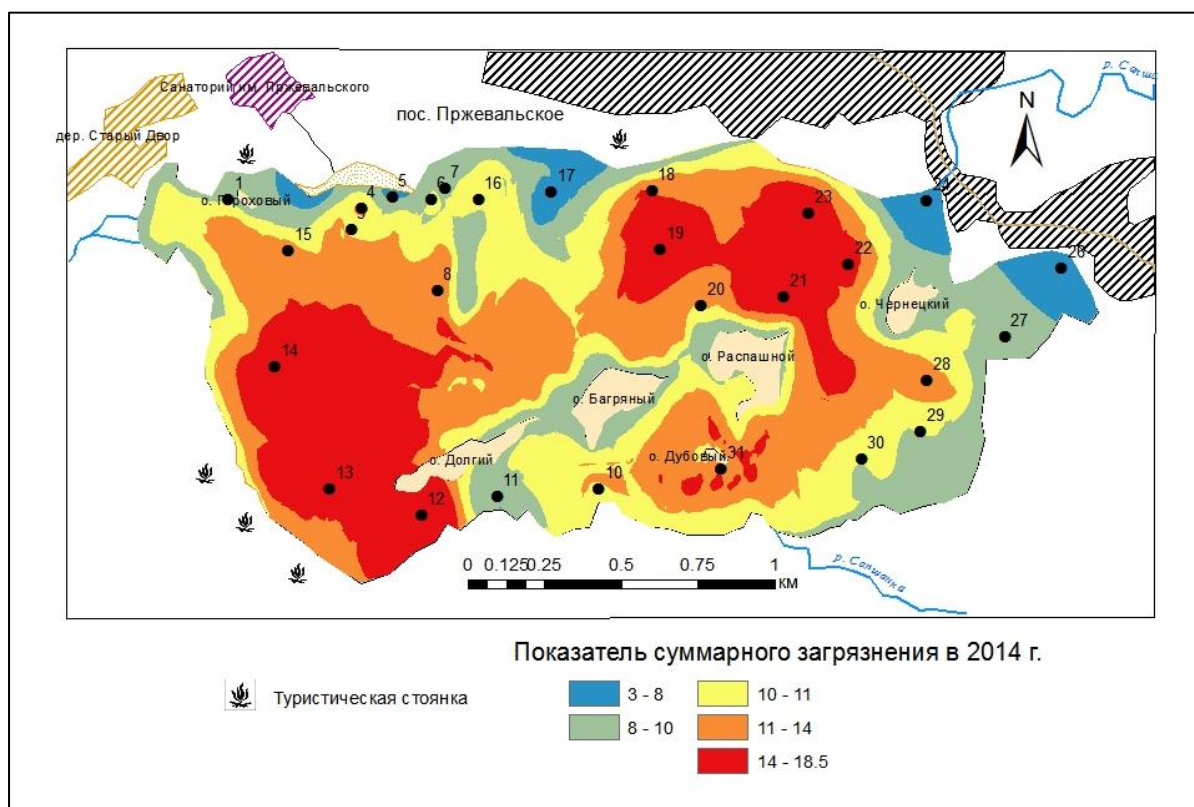


Рис. 18. Распределение показателя Z_c в 2014 г.

Чаще всего превышали фон Pb и Zn, а также Ti и V (в 19-22 пробах). По размеру превышения лидирует Zr (от 0 до 9,7), что говорит о неравномерности его распространения.

Таблица 9. Показатель суммарного загрязнения в пробах 2014 г.

N точки	Z_c	N точки	Z_c
1	10.27	17	4.22
2	5.93	18	9.99
3	8.98	19	11.84
4	12.16	20	8.30
5	7.30	21	10.41
6	10.03	22	13.03
7	8.46	23	13.88
8	9.89	24	3.25
9	8.57	25	9.98
10	11.40	26	6.58
11	8.07	27	8.90
12	18.49	28	11.41
13	12.80	29	8.63
14	11.77	30	8.73
15	10.28	31	12.53
16	9.45		

В 2015 г. было отобрано 11 проб донных осадков (рис.19).

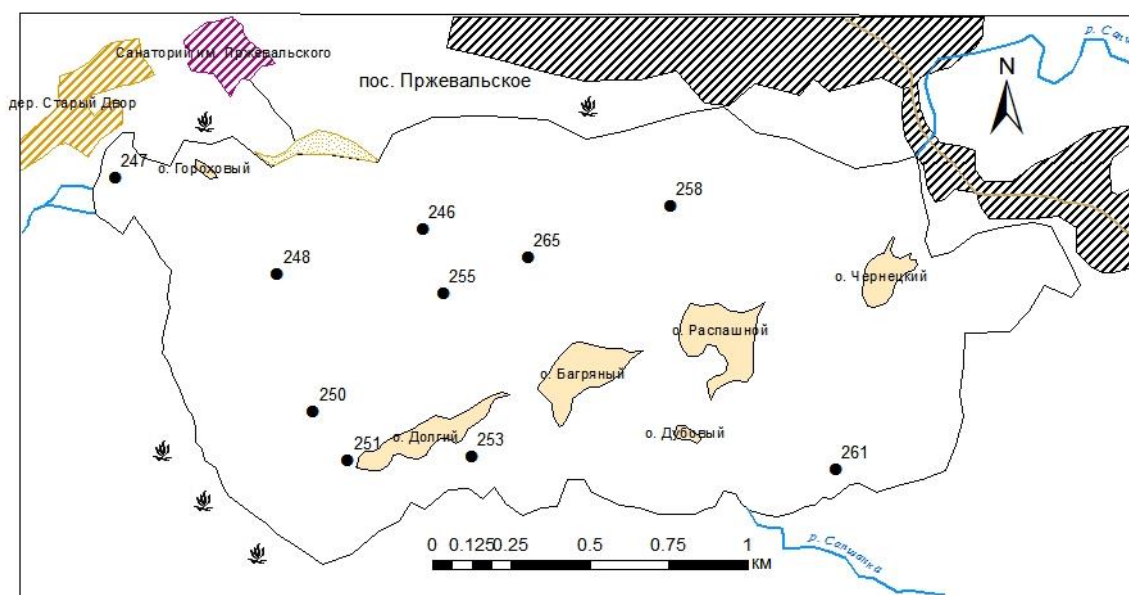


Рис. 19. Карта-схема пробоотбора в 2015 г.

Расчёт коэффициентов парных корреляций (табл. 11) выявил достаточно сильную связь между всеми элементами (0,70-0,99). Исключение составили К и Zr, связь которых с остальными элементами очень мала, но между собой составляет 0,57. Зрительно элементы можно разделить на три группы. Са, V и Си концентрируются в глубоководной восточной части, тем не менее, в более глубокой части озера к востоку концентрации значительно снижаются. Следующая ассоциация, состоящая из Fe, Mn, Pb, Zn и Sr, тяготеет к глубине, а также показывает максимальные концентрации вблизи пос. Пржевальское, что может свидетельствовать о частично антропогенном их поступлении в озеро со стоками. Ti, K, Rb и Zr распространены аналогично Sr и Са в 2014 г. – имеют явный максимум у о. Долгий.

Как и в предыдущем году, зависимость от мехсостава достаточно мала. Лишь в случае Ti и Zr наблюдается некоторое тяготение к крупным по размеру осадкам.

По данным этого года был также рассчитан показатель суммарного загрязнения (табл. 10).

Таблица 10. Показатель суммарного загрязнения в пробах 2015 г.

№ пробы	Zc
246	2.51
247	1.01
248	7.61
250	6.81
253	1.00
255	10.67
257	1.05

261	1.28
264	1.00
265	11.42
251	5.11

Значения его намного ниже (в среднем по озеру 4.5), чем в предыдущем году, что обусловлено скорее разными местами пробоотбора и количеством проб, чем ослаблением загрязнения, ведь скорость осадконакопления слишком мала для обнаружения изменений за 1 год. В двух точках – 255 и 265 – встречены значения больше 10, что означает средний уровень загрязнения. Скорее всего, это обусловлено илистым гранулометрическим составом осадков и высоким содержанием органики. Помимо этих точек, максимальное число превышений фона (для 11 элементов) встречено и в точках 248 и 250, также находящихся в глубоководной части озера. Соответственно, минимальные значения замечены в песчаных донных осадках, отобранных поблизости от берега озера или островов (рис. 20).

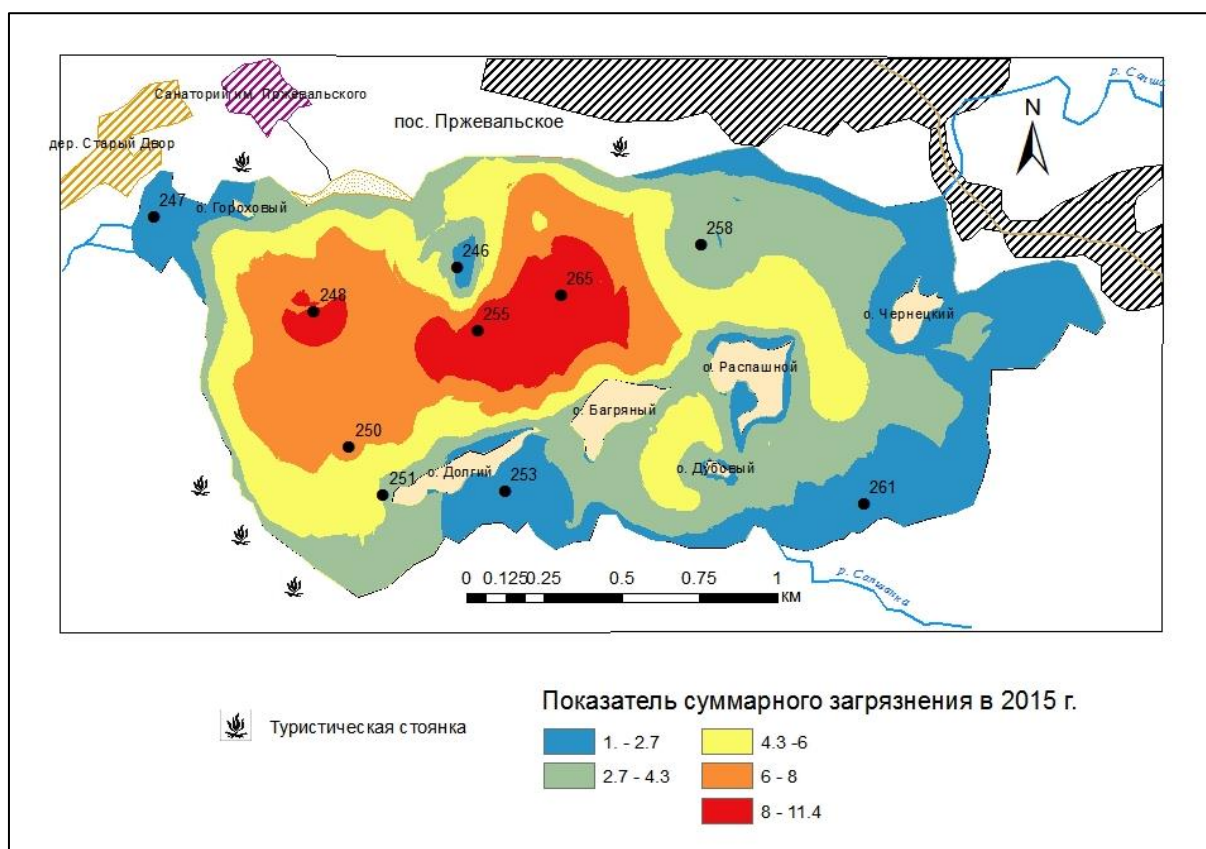


Рис. 20. Распределение показателя Z_c в 2015 г.

Таблица 11. Парные корреляции для валовых содержаний элементов в 2015 г.

Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Pb	K	Ca	Ti	V	Zr	Rb	Sr	Y	
	0.95	0.91	0.73	0.91	0.88	-0.17	0.85	0.69	0.87	-0.26	0.74	0.88	0.88	Mn
		0.94	0.66	0.99	0.96	-0.15	0.85	0.75	0.91	-0.14	0.84	0.97	0.93	Fe
			0.79	0.90	0.90	-0.03	0.84	0.73	0.94	-0.08	0.87	0.91	0.91	Co
				0.57	0.62	-0.23	0.80	0.56	0.82	-0.17	0.48	0.60	0.73	Cu
					0.96	-0.08	0.81	0.77	0.88	-0.07	0.84	0.97	0.93	Zn
						-0.09	0.82	0.72	0.93	-0.14	0.87	0.96	0.95	Pb
							-0.05	0.32	-0.07	0.57	0.07	-0.11	-0.01	K
								0.88	0.93	0.11	0.64	0.78	0.89	Ca
									0.79	0.43	0.60	0.72	0.82	Ti
										0.01	0.81	0.88	0.94	V
											-0.03	-0.10	-0.09	Zr
												0.91	0.78	Rb
													0.91	Sr
														Y

3.4. Анализ пространственного распределения элементов в подвижных формах и их валового содержания в донных осадках в 2016 г.

Тяжёлые металлы в подвижных формах распределены в донных осадках озера неравномерно (табл. 12). Тем не менее, некоторые общие тенденции наблюдаются: например, концентрации почти всех элементов положительно коррелируют с содержанием органического углерода, потому что органика является одним из самых активных природных сорбентов, в то время как связь со средним размером частиц отрицательна. Исключение составляет Cu: большие количества этого элемента обнаружены в более крупных по гранулометрическому составу осадках (обнаружена слабая положительная корреляция – 0,13), связь же с количеством органики отрицательна (как и у Cr).

Таблица 12. Концентрации подвижных форм тяжёлых металлов в пробах донных осадков (мг/кг)

N	Fe	Ni	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Co	Mn
1	859	1.08	1.12	1.91	21.6	7.4	0.32	0.85	511
3	2395	1.41	0.25	0.17	20.1	5.8	0.30	0.26	2670
4	861.5	0.49	0.84	1.22	9.0	7.6	0.11	0.16	205.5
5	2680	0.99	0.18	0.23	22.3	11.6	0.32	1.05	1340
6	1685	0.89	0.53	1.05	19.9	16.4	0.34	1.00	654
7	721	0.53	0.26	3.53	8.5	16.3	0.11	0.79	108.5
8	1117	0.50	0.20	2.79	15.2	17.6	0.23	1.32	552.5
9	2070	0.80	0.03	3.58	11.9	19.7	0.19	1.43	712.5
10	767.5	1.37	0.30	2.48	8.4	11.0	0.08	0.52	761.5
11	705.5	2.00	0.42	1.74	7.9	21.4	0.09	0.85	382.5
12	674	2.09	0.56	1.26	13.4	22.9	0.24	1.29	654.5
13	876.5	2.34	0.46	2.52	19.4	25.5	0.34	1.45	1715
14	810	2.51	0.03	3.16	17.2	27.7	0.23	1.48	1045
15	409	3.00	0.03	3.77	17.4	27.9	0.07	1.65	271
16	795	2.81	0.03	3.38	15.1	32.1	0.25	1.74	618.5

На рис. 21-24 показано распределение металлов в зависимости от типа осадков по гранулометрическому составу (элементы сгруппированы по величине концентраций (в мг/кг)).

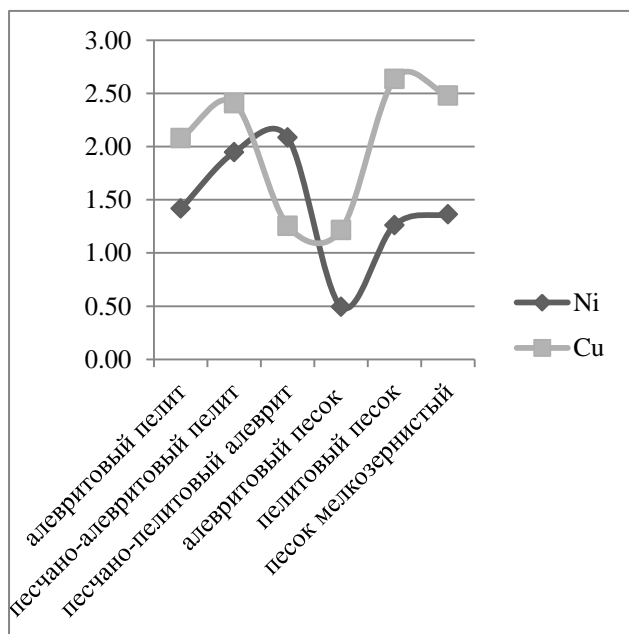


Рис. 21. Зависимость содержания Ni и Cr от грансостава

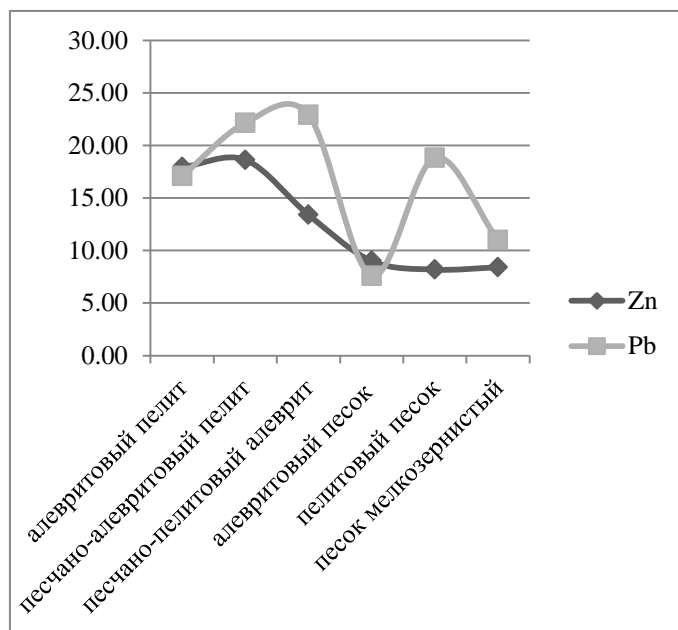


Рис. 22. Зависимость содержания Zn и Pb от грансостава

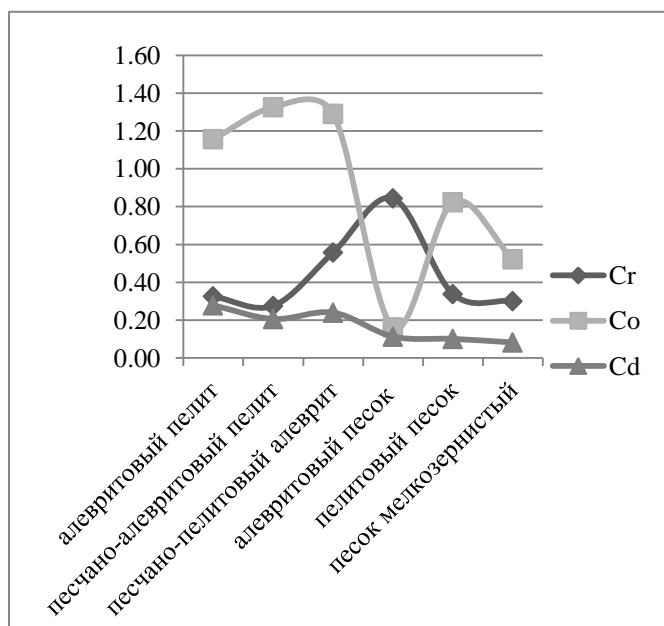


Рис. 23. Зависимость содержания Cr, Co и Cd от грансостава

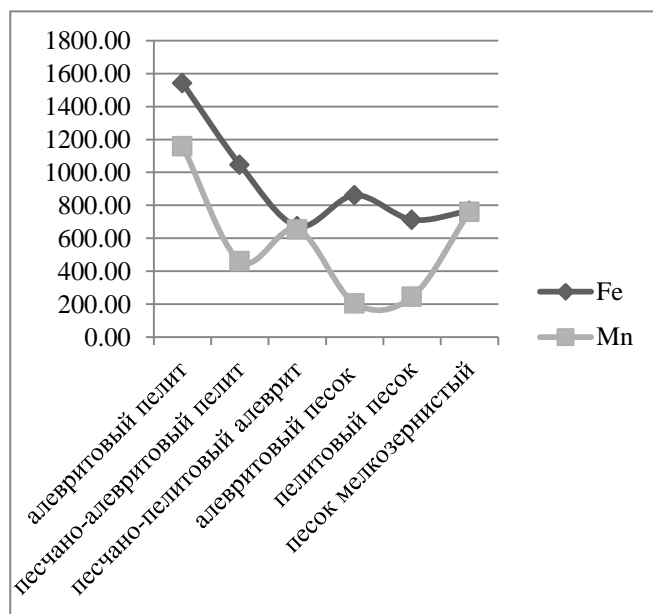


Рис. 24. Зависимость содержания Fe и Mn от грансостава

Co, Ni и Pb образуют группу элементов, в максимальных количествах накапливающихся в песчано-пелитовых алевритах, а в минимальных – в алевритовых песках. Такая закономерность, скорее всего, является проявлением дисперсии – среди изучаемых проб лишь одна относилась к типу алевритовых песков. Содержания Cr и Cu показывают сильную отрицательную корреляцию и не входят в ассоциации с

другими элементами. Как уже было упомянуто, Cu тяготеет к крупным осадкам, тем не менее, достаточно большие концентрации обнаружены и в пелитах. Распределение Cr прямо противоположно - это единственный элемент с явным максимумом в алевроитовых песках. Два элемента – Zn и Cd – почти линейно убывают с увеличением размера частиц в осадке. Fe и Mn имеют явный максимум в самом мелком типе осадка и локальные в алевроитовых песках и песчано-пелитовых алевроитах соответственно.

На основе изучения таблицы корреляций (табл. 13) и пространственного распределения металлов можно сделать вывод о том, что элементы находятся в ассоциациях. Первую группу образуют Fe, Mn, Zn и Cd, вторую – Co, Cu, Pb и Ni. Cr не имеет тесных связей с элементами, но относится скорее к первой группе.

Таблица 13. Парные корреляции распределения элементов в донных осадках в 2016 г.

Глуб.	Сорг	M	Fe	Ni	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	Co	Mn	
	-0.08	0.13	0.39	-0.06	-0.02	-0.28	0.42	-0.31	0.45	-0.31	0.66	Глуб.
		-0.69	0.25	0.39	-0.17	-0.04	0.51	0.32	0.46	0.53	0.40	Сорг
			-0.45	0.02	-0.22	0.13	-0.73	-0.27	-0.64	-0.63	0.11	M
				-0.41	-0.24	-0.54	0.48	-0.43	0.52	-0.19	0.63	Fe
					-0.28	0.25	0.14	0.73	-0.06	0.56	0.10	Ni
						-0.42	0.10	-0.50	0.23	-0.48	-0.14	Cr
							-0.37	0.61	-0.46	0.58	-0.52	Cu
								-0.08	0.82	0.24	0.54	Zn
									-0.11	0.87	-0.26	Pb
										0.16	0.58	Cd
											-0.19	Co
												Mn

Распределение Cd и Zn наиболее тесно связано с размером частиц осадка: они активнее накапливаются в мелких осадках озера - алевроитовых пелитах и песчано-алевритовых пелитах (максимальные концентрации отмечены в точках 1, 15 и 16). Mn из этой же ассоциации показывает самую явную зависимость концентрации от глубины (коэффициент корреляции равен 0,66) и достигает максимальной концентрации 2670 мг/ кг в точке 3 (12 м). Распределение Fe также достаточно неравномерно, в центре озера наблюдаются минимальные значения, к западу и к востоку же концентрации увеличиваются, достигая 2680 мг/кг в точке 5 и 2395 мг/кг в точке 3.

Металлы второй группы активнее накапливаются в северной части озера, прилегающей к пос. Пржевальское (концентрации некоторых элементов в точках 15-16

на порядок выше, чем в остальных). Максимальное количество Cr (1,12 мг/кг), например, замечено у места туристических стоянок. Возможно, это означает, что металлы поступают в озеро непосредственно вследствие деятельности посёлка.

Среди всех измеряемых элементов (Fe, Ni, Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Mn, V и As) в донных осадках озера валовые содержания некоторых оказались ниже порога обнаружения: содержание As < 50 мг/кг, Co и Cd < 1 мг/кг. Остальные элементы распределяются по дну и накапливаются по-разному (табл. 14).

Таблица 14. Валовое содержание тяжёлых металлов в пробах донных осадков (мг/кг)

N/элемент	Fe	Ni	Cr	Cu	Zn	Pb	Mn	V
1	25584	51.67	74.36	17.69	124.78	143.35	879.6	95.83
3	38831	11.63	19.16	11.22	149.07	102.61	3549.8	30.79
4	13657	8.30	16.16	4.20	68.33	0.25	522.7	17.10
5	28099	36.36	22.13	19.22	327.77	0.25	1518.9	36.29
6	22489	14.32	23.23	16.50	145.10	151.48	796.0	32.30
7	11828	28.62	8.31	7.64	194.75	91.56	504.8	17.52
8	24222	37.29	26.56	21.42	252.76	0.25	877.1	36.80
9	34060	47.54	28.03	22.98	279.31	183.29	1150.5	49.61
10	39853	8.06	15.83	7.59	81.01	136.20	1474.7	14.07
11	31610	10.14	21.64	11.94	259.92	84.75	1001.2	24.10
12	34638	15.63	26.89	23.28	152.27	72.91	912.7	32.93
13	35798	10.59	22.11	21.49	99.55	0.25	2734.6	32.64
14	33075	10.26	22.45	21.37	160.91	82.24	1648.3	34.75
15	16112	7.62	20.98	22.73	264.76	88.18	455.5	29.97
16	32655	11.23	26.19	21.59	170.69	0.25	1376.7	36.03

Валовые содержания Fe и Mn максимальны на юго-западе озера, притом в случае Fe явно виден шлейф, распространяющийся от точки 10 (39853 мг/кг) вглубь озера (рис. 25). Нужно заметить, что осадки здесь достаточно крупные по гранулометрическому составу (мелкозернистые пески) и бедные органикой, что может быть признаком антропогенного вклада в столь высокие содержания этого элемента. В то же время подсчёт доли подвижных форм в валовом содержании, позволяющий оценить миграционную способность элементов, показывает, что для Fe подвижность выше в восточной части озера с максимумом в точке 5 – 9,5% (рис. 26).

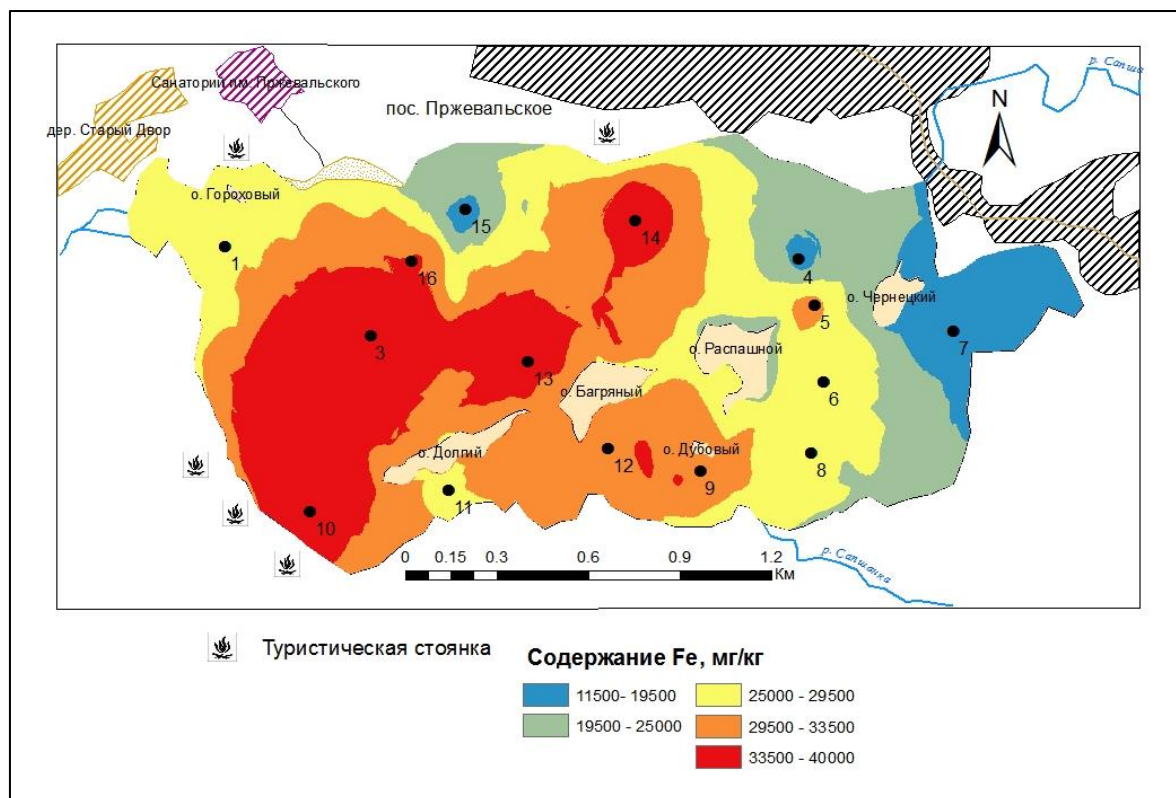


Рис. 25. Распределение валового содержания Fe

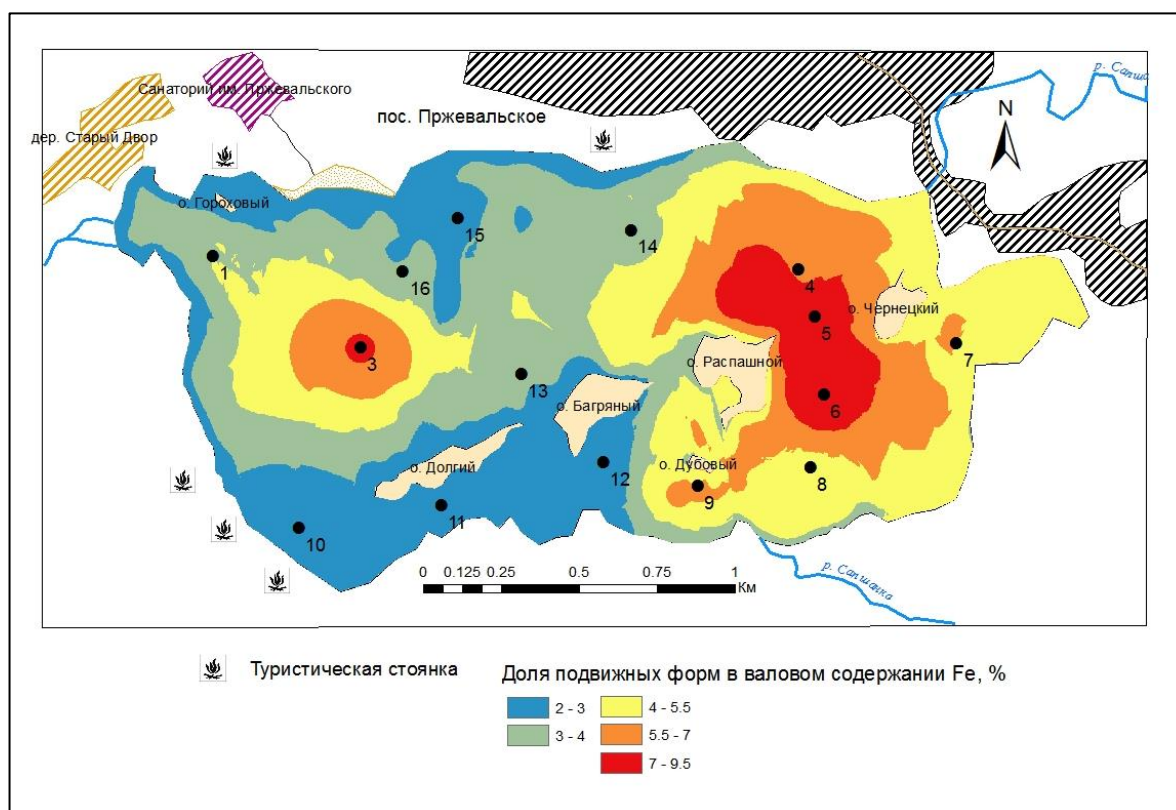


Рис. 26. Распределение доли подвижных форм Fe в валовом содержании (%)

Высокие содержания Mn (3550 мг/кг) наблюдаются в понижениях котловины озера, где происходит накопление (рис. 27). Следов привнесения элемента извне не наблюдается. Доля металла в подвижной форме очень высока и коррелирует с глубиной (от 21% в мелководных областях до 88% в центре озера), скорее всего, это является особенностью миграции Mn в системе «вода-донные осадки».

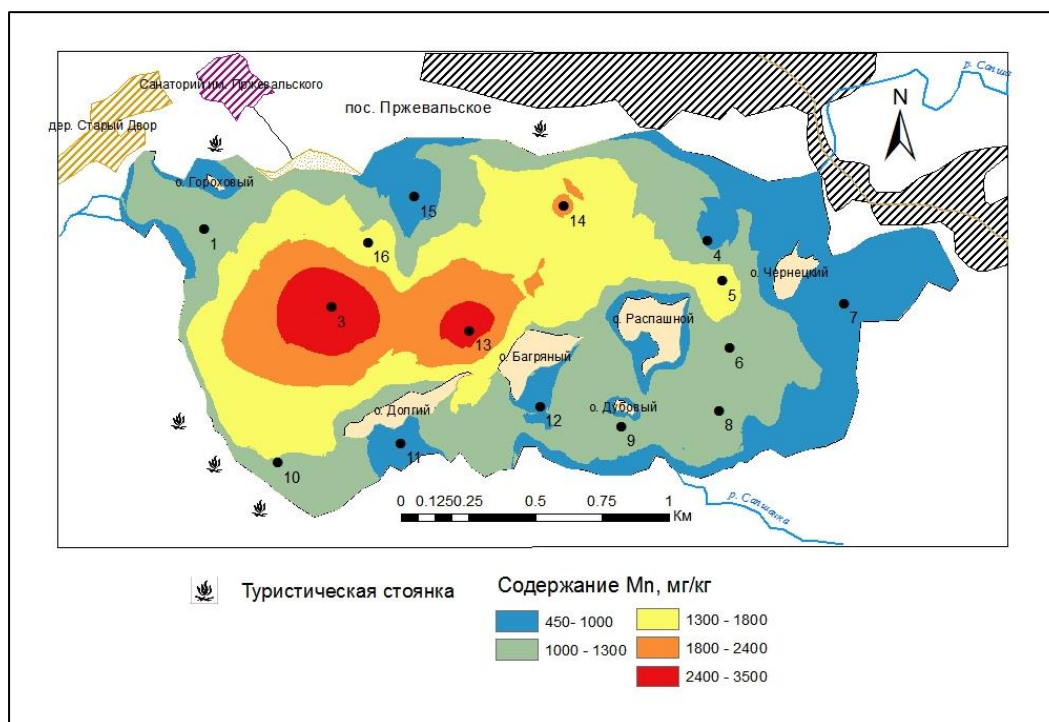


Рис. 27. Распределение валового содержания Mn

Значения содержания V, Ni и Cr максимальны на северо-западе, в месте впадения ручья и около дер. Старый Двор (95.8, 51.7 и 74.4 мг/кг соответственно) (рис.28-30). Для Ni такие же высокие значения встречаются и около о. Дубовый. В остальном распределение их по озеру достаточно равномерное. Доля подвижного Cr в валовом содержании невелика (до 5%), для Ni колебания этого показателя больше – от 6% и менее на юго-востоке и северо-западе до 39% на севере, недалеко от пляжей санатория.

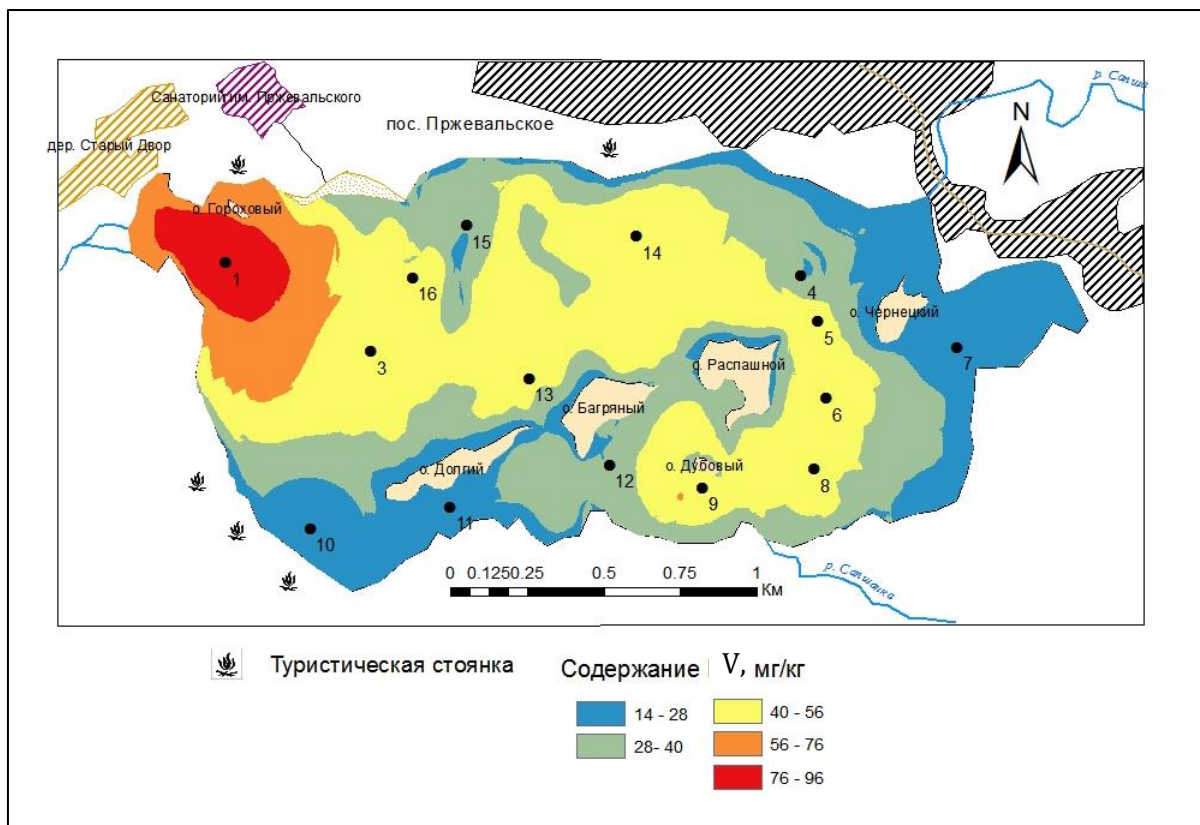


Рис. 28. Распределение валового содержания V

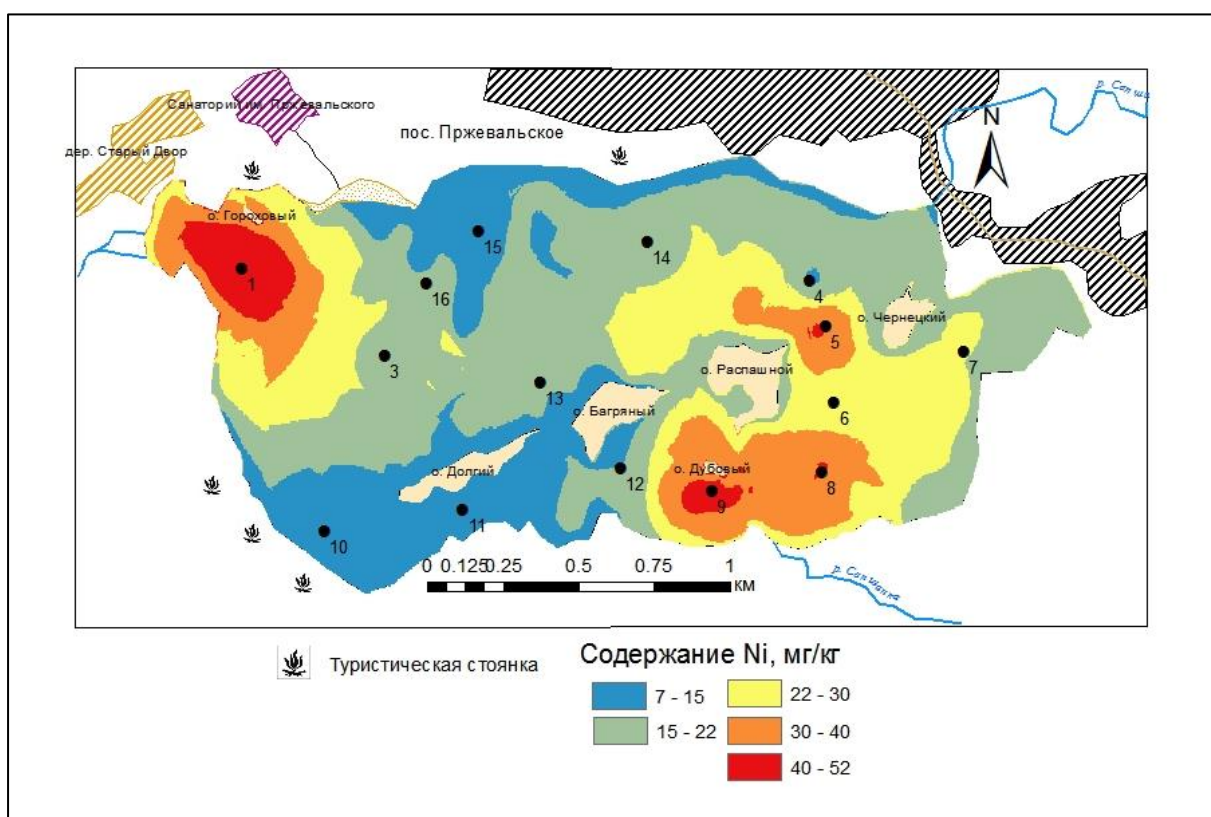


Рис. 29. Распределение валового содержания Ni

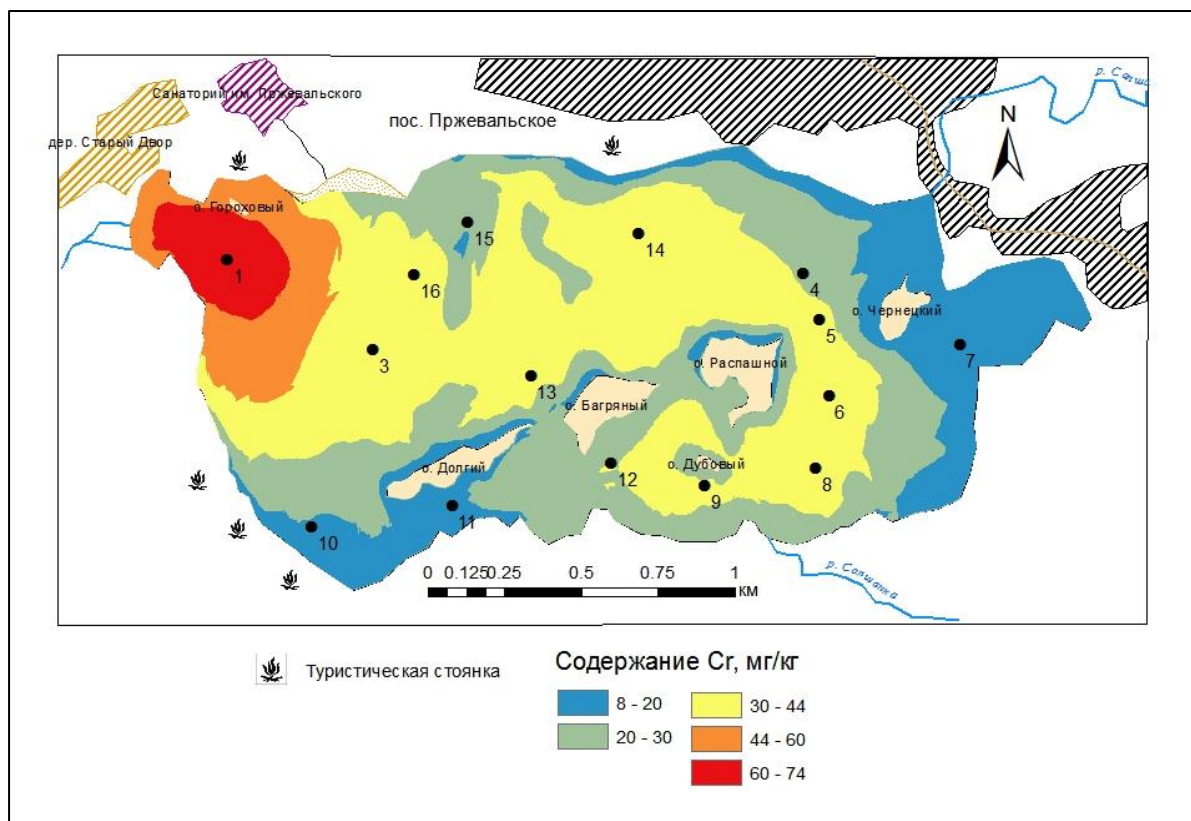


Рис. 30. Распределение валового содержания Cr

Распределение Zn (рис. 31) крайне неравномерно и не зависит сильно ни от размера частиц осадка, ни от содержания $C_{орг}$. Одинаково высокие количества (до 327 мг/кг) обнаружены как у берегов, так и в глубоководной части, что может свидетельствовать о наличии внешних источников элемента. Максимальная доля подвижных форм (до 19%) обнаружена на северо-западе около туристической стоянки, а также в центре озера. Содержание Pb также сильно меняется: в некоторых пробах, отобранных в центральной и северной части озера, его содержание ниже порога чувствительности метода анализа, но на западе и около о. Дубовый его количество возрастает до 183 мг/кг. Доля подвижных форм увеличивается до 33% на участке у пос. Пржевальское, что может быть вызвано изменением геохимической обстановки за счёт бытовых стоков.

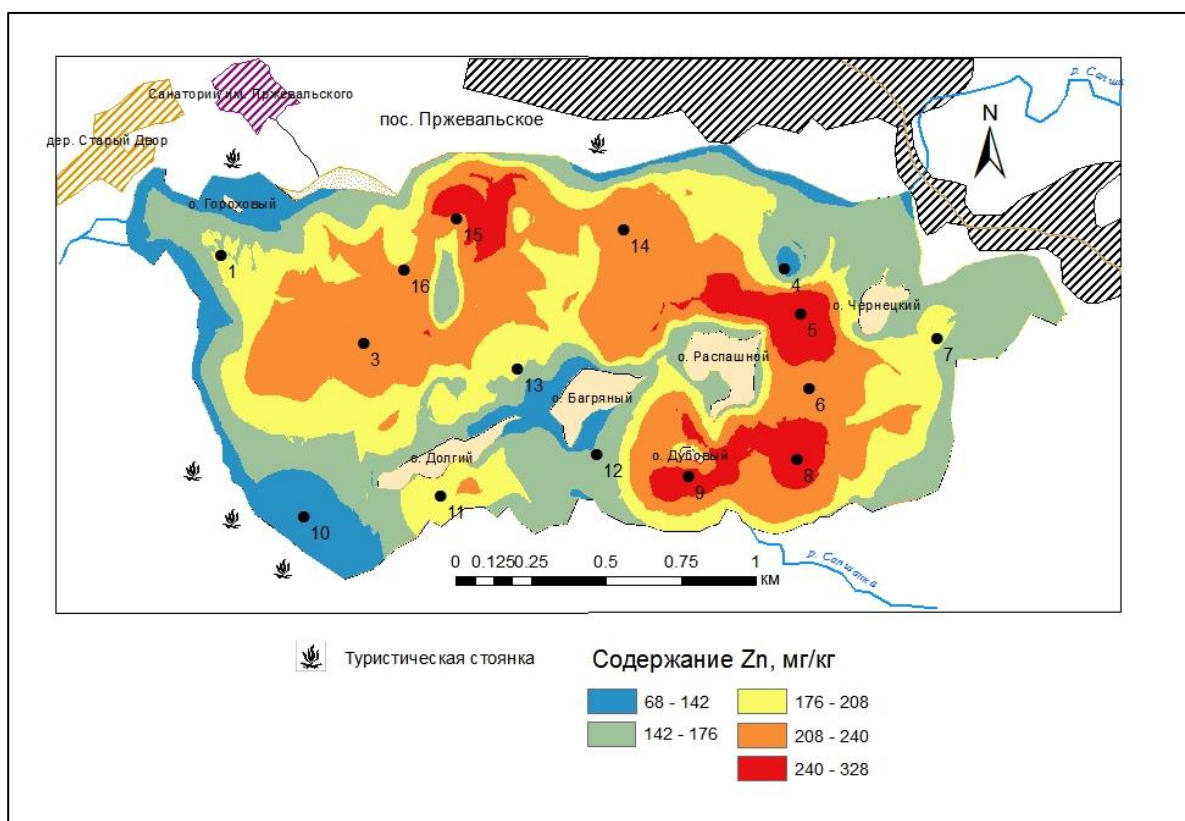


Рис. 31. Распределение валового содержания Zn

Максимальные количества Cu (18-23 мг/кг) распределены в центре озера в виде полосы, вытянутой с севера на юг. Концентрации коррелируют с содержанием $C_{орг}$ сильнее, чем любой другой металл (0.91), связь со средним размером частиц также велика (-0.78), притом наблюдается сильная связь (0,7) с самыми мелкими фракциями (0.005-0.001 мм и менее). Интересно, что для процентного содержания подвижных форм в валовом содержании для Cu (а также в меньшей степени Cr и Ni) зависимость от органики и грансостава противоположна, поэтому можно сказать, что этот элемент переходит в подвижную форму в более крупных осадках. Это отражается и географически (рис. 32-33).

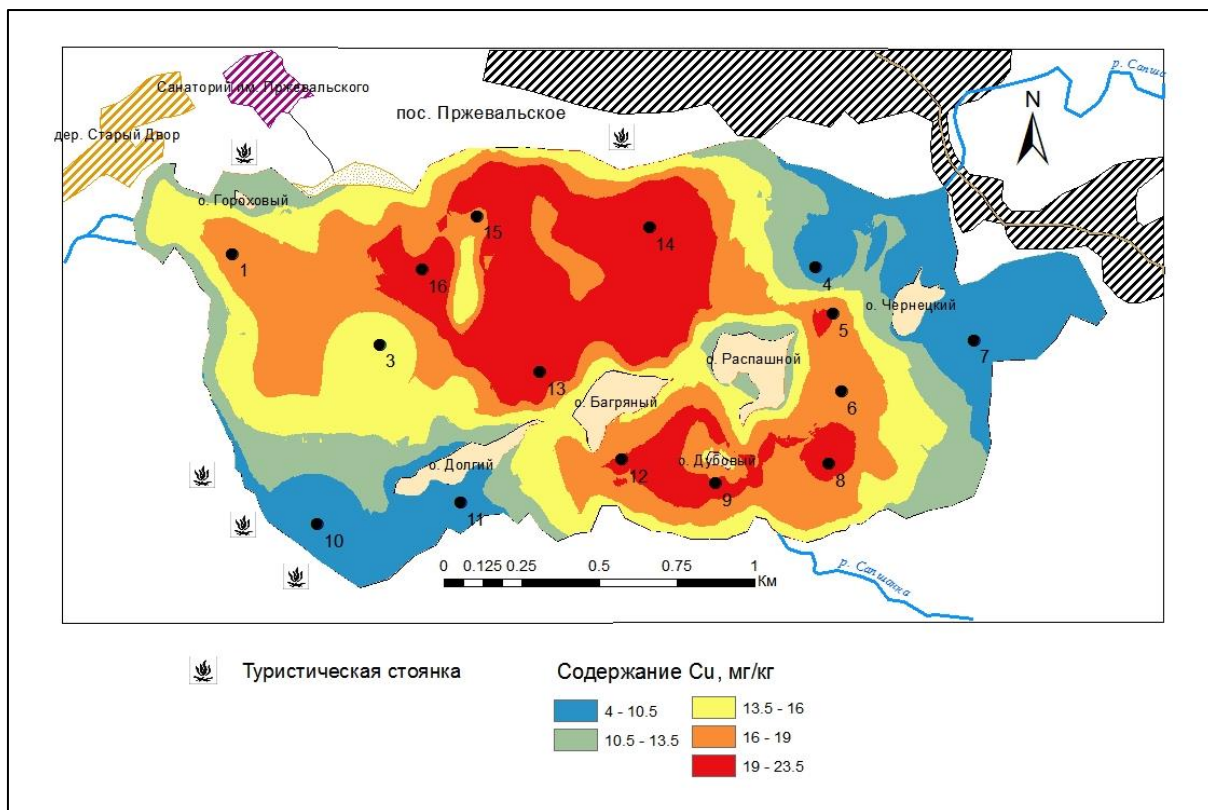


Рис. 32. Распределение валового содержания Cu

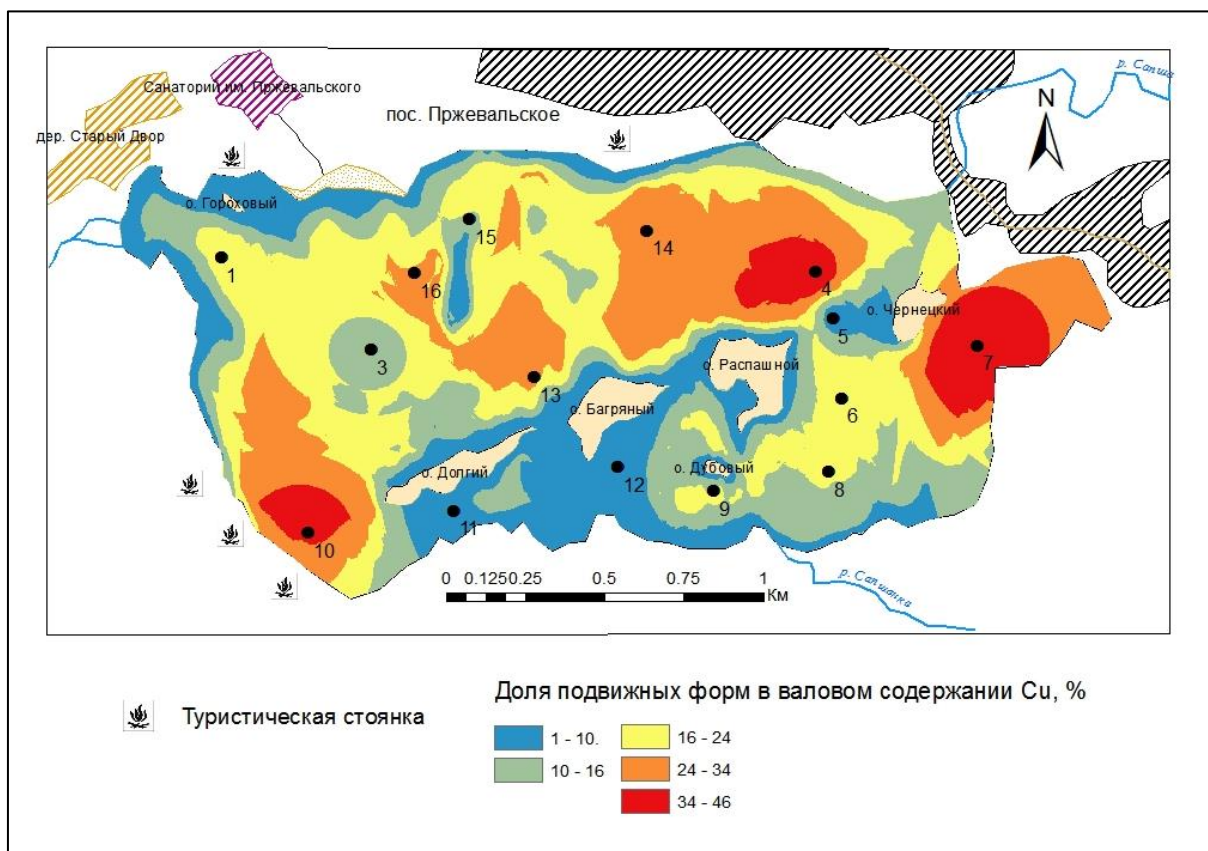


Рис. 33. Распределение доли подвижных форм Cu в валовом содержании (%)

Расчёт коэффициента суммарного загрязнения проводился двумя способами. В первом случае фоновые значения рассчитывались аналогично предыдущим годам (средние значения за исключением превышающих среднее плюс два стандартных отклонения). Этот метод выявил низкое значение загрязнения (в среднем 3,02) во всех пробах за 2016 г. (табл. 15, рис. 34).

Таблица 15. Показатель суммарного загрязнения (метод 1)

Номер пробы	Z_c	Номер пробы	Z_c
1	8,4	10	2,5
3	3,9	11	1,7
4	1,0	12	2,0
5	3,5	13	3,1
6	2,1	14	2,2
7	1,8	15	2,0
8	3,1	16	2,1
9	6,1		

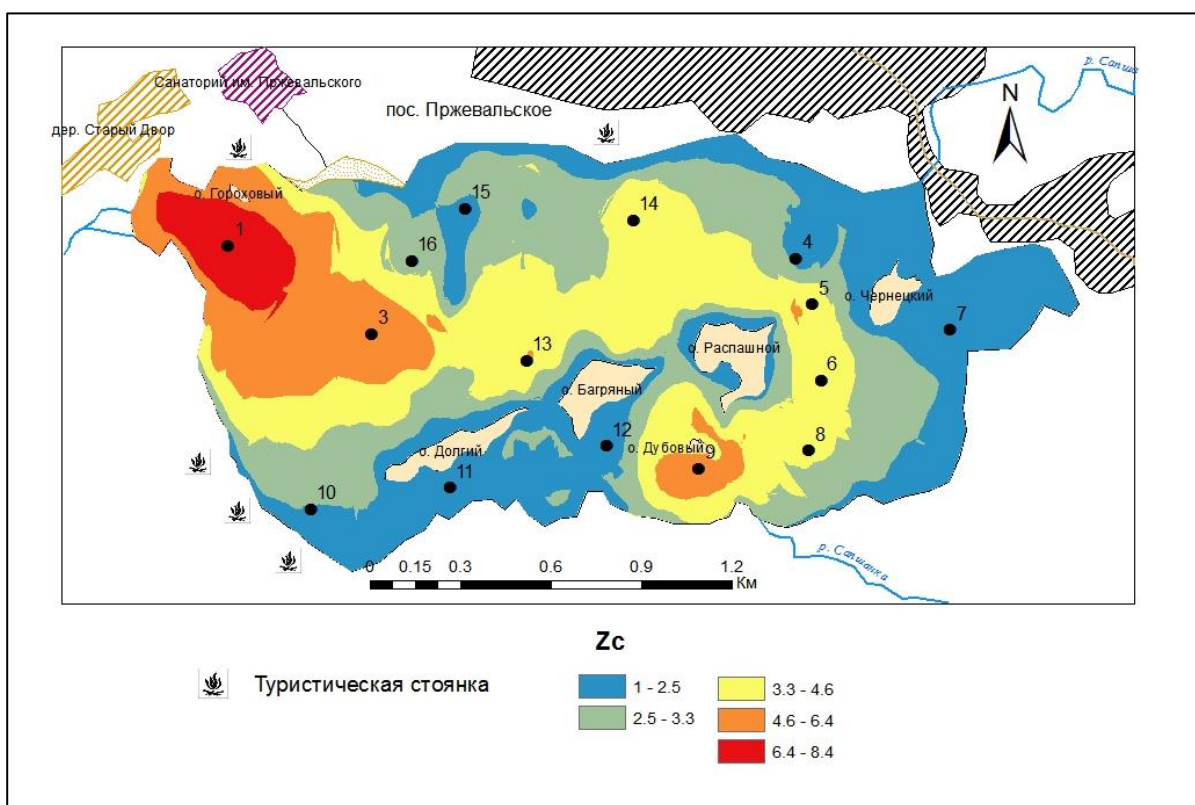


Рис. 34. Распределение показателя Z_c в 2016 г. (метод 1)

Максимальные значения (8 и 6) обнаружены в двух точках (1 и 9), одна из них находится около места туристической стоянки и дер. Старый Двор, другая – у устья р. Сапшанка, чем можно и объяснить увеличение показателя. Точка 9 лидирует и по числу превышений фона – в ней они наблюдаются для каждого элемента. Шесть

превышений замечено в пробах 5 и 14, представленных достаточно мелкими осадками, но даже в песчаных пробах (10) наблюдаются превышения по Fe, Mn и Pb. Притом самой «чистой» (без превышений фона) оказалась проба с более илистым грансоставом (4), что может свидетельствовать о загрязнении в точке 10. Среди элементов по количеству превышений лидируют Cr и V (в 10 пробах), а также Pb и Cu (в 9). Наиболее высокая корреляция показателя наблюдается с Ni (0.88), Cr (0.89) и особенно V (0.93), что свидетельствует о его сильном вкладе. Связь показателя с органическим углеродом (0,77) и грансоставом (-0,44) достаточно велика, что указывает на преобладание естественных причин его значений. В то же время явно видно увеличение показателя на северо-западе, не обусловленное механическими особенностями донных осадков или количеством органического углерода.

Во втором способе в качестве фоновых значений были взяты кларки элементов в песчаниках (табл. 16).

Таблица 16. Содержания элементов, используемые в качестве фона при расчёте Z_c

Элемент	Fe	Ni	Cr	Cu	Zn	Pb	Mn	V
Кларк в песчаниках, мг/кг (Алексеев, 2013)	9800	95	35	1	80	20	670	130
Среднее валовое содержание, кроме $x > \bar{x} + 2\sigma$	28167	18	21	17	182	76	1143	30

В этом случае значения показателя оказались намного выше (табл. 17), лишь в пробе 4 выявлен низкий уровень загрязнения, в остальных он средний (среднее по озеру значение 24,1), а в пробе 9 – высокий.

Таблица 17. Показатель суммарного загрязнения (метод 2)

Номер пробы	Z_c	Номер пробы	Z_c
1	27,5	10	17,7
3	23,5	11	20,1
4	4,6	12	29,7
5	25,5	13	27,5
6	25,4	14	29,3
7	12,9	15	29,1
8	25,4	16	26,1
9	36,8		

Также заметно не только увеличение показателя, но и другой характер распределения в пространстве (рис. 35).

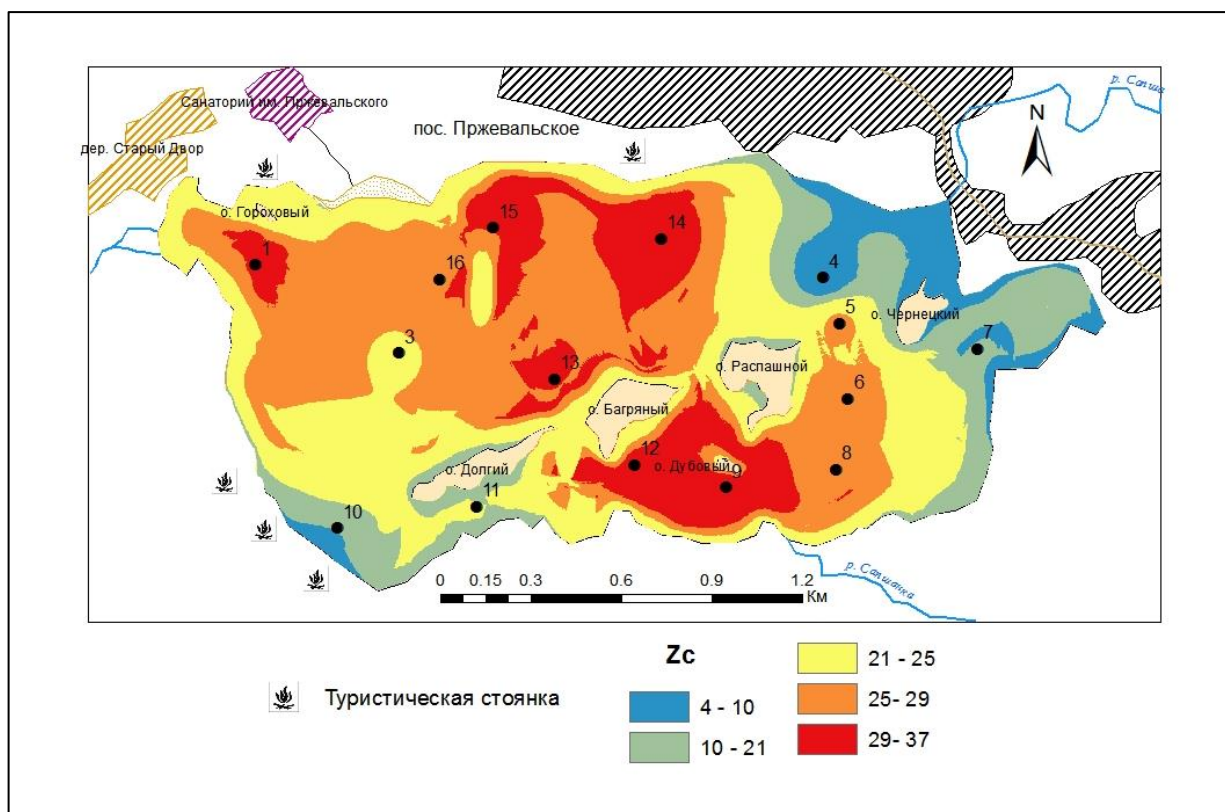


Рис. 35. Распределение показателя Z_c в 2016 г. (метод 2)

В песчаных отложениях мелководья значения ожидаемо низкие (за исключением точки 10). В остальном распределение показателя достаточно равномерно, он колеблется от 20 до 30 в большей части озера. Максимальные значения замечены на севере, около посёлка, и на юге, около о. Дубовый; на северо-западе, в месте явного максимума загрязнения при расчёте первым способом, значение чуть ниже, хотя там замечено максимальное число превышений фона элементами (в 6 случаях). В целом распределение согласуется со средним размером частиц (корреляция -0,72) и содержанием органики (0,89). Такие элементы как Ni и V не превышали фон, для Cr это встречается однажды, в отличие от расчёта первым методом. Остальные элементы превышали фон практически во всех пробах. Наиболее сильная корреляция показателя наблюдается с содержанием Cu (0.94), что указывает на её вклад в высокие значения показателя. Такие сильные различия о вкладе элементов в значения коэффициента, рассчитанные разными методами, объясняются непосредственно отличиями средних значений от кларка (табл. 16). Среднее содержание Ni, V и Cr намного ниже кларка, в то время как Cu – в 16 раз больше, Fe – в 3, Zn и Mn примерно в 2, а Pb – в 4. И если в случае Fe и Mn превышения можно объяснить локальными

геологическими особенностями, то столь высокое содержание Cu, Zn и Pb может иметь антропогенный источник.

Проведение факторного анализа для валового содержания элементов (табл. 18) отдельно для выборок с включением грансостава и органики и без выделило фактор размера частиц как один их главных,

Таблица 18. Значения факторов для валовых содержаний элементов (с учётом гранулометрического состава и $C_{орг}$ и без)

Элемент	Ф1	Ф2	Ф3	Элемент	Ф1	Ф2	Ф3
Fe	-0,25	0,72	0,48	Fe	0,04	0,91	-0,14
Ni	-0,68	-0,49	0,04	Ni	0,83	-0,21	-0,05
Cr	-0,74	-0,35	0,45	Cr	0,88	0,14	0,31
Cu	-0,77	0,21	-0,31	Cu	0,54	0,21	-0,64
Zn	-0,44	-0,05	-0,68	Zn	0,31	-0,34	-0,75
Pb	-0,11	-0,36	0,56	Pb	0,36	0,08	0,48
Mn	-0,11	0,83	0,35	Mn	-0,18	0,87	-0,12
V	-0,85	-0,33	0,36	V	0,95	0,15	0,17
$C_{орг}$	-0,86	0,43	-0,12	Общ. дисперсия	2,91	1,84	1,37
М	0,78	-0,18	0,31	Доля дисперсии	0,36	0,23	0,17
Общ. дисперсия	3,94	2,08	1,67				
Доля дисперсии	0,39	0,21	0,17				

$$\Phi 1: \frac{M(0,78)}{C_{орг}(-0,86) V(-0,85) Cu(-0,77) Cr(-0,74) Ni(-0,68)}$$

На рис. 36 можно явно выделить две ассоциации элементов: Fe-Mn, сильно подверженные влиянию Ф2, и V-Cr-Ni, на которых больше влияет Ф1. Средний размер частиц также сильно связан с Ф1, что позволяет сделать вывод о том, что Ф1 – фактор размера частиц осадка, и большинство элементов связаны с илистыми осадками. Cu и V имеют корреляционные связи с этим показателем (табл. 19), что говорит о том, что эти элементы по максимуму накапливаются в самых мелких осадках. Ф2 из-за сильного обособления Fe и Mn может означать образование гидроксидов элементов.

Таблица 19. Парные корреляции для валового содержания металлов

Fe	Ni	Cr	Cu	Zn	Pb	Mn	Ba	V	М	$C_{орг}$	
	-0,09	0,09	0,24	-0,11	0,14	0,70	0,16	0,08	0,48	-0,02	Fe
		0,60	0,31	0,41	0,25	-0,20	0,39	0,72	0,33	-0,35	Ni
			0,34	-0,08	0,26	-0,10	0,29	0,96	0,45	-0,38	Cr
				0,45	-0,08	0,02	0,18	0,44	0,75	-0,69	Cu
					-0,03	-0,20	0,08	0,07	0,47	-0,39	Zn
						-0,10	0,24	0,29	-0,13	0,16	Pb
							0,02	-0,03	0,38	-0,19	Mn
								0,38	0,31	-0,20	Ba
									0,54	-0,52	V
										-0,73	М
											$C_{орг}$

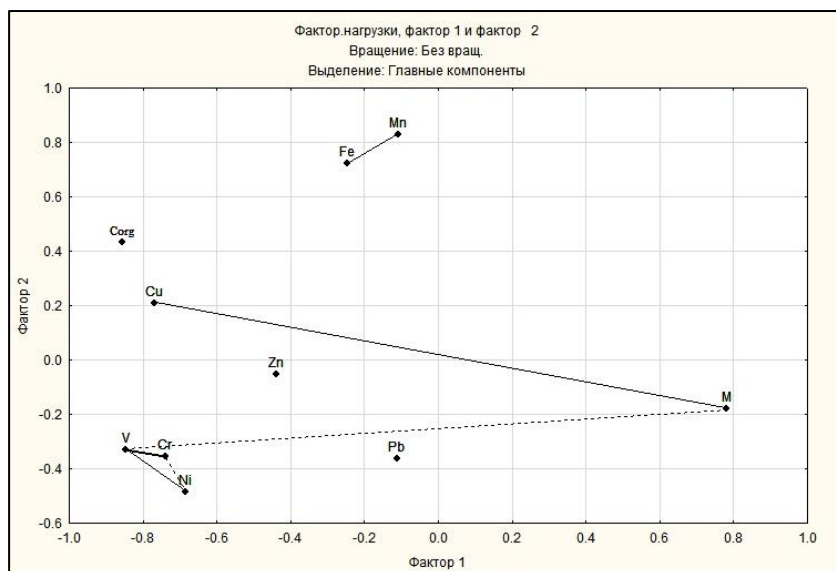


Рис. 36. Результаты факторного анализа (Ф1 и 2) для валового содержания металлов, среднего размера частиц и органики (здесь и далее толстыми линиями показана корреляция 0,8-1, тонкими – 0,65-0,8, пунктирными – 0,5-0,65)

Наложение значений факторов для точек отбора проб только подтверждает эти закономерности (рис. 37). Например, пробы 10, 4 и 7, подверженные действию фактора 2, состоят из самого крупного материала по сравнению с остальными пробами, в то время как 1 и 9 представлены алевритовыми пелитами. В то же время Ф2 отметил пробы, отобранные в самом глубоком участке в центре озера (13 и 3) и, наоборот, близко к берегу (1, 4 и 7), что говорит о том, что активность образования гидроксидов коррелирует с глубиной.

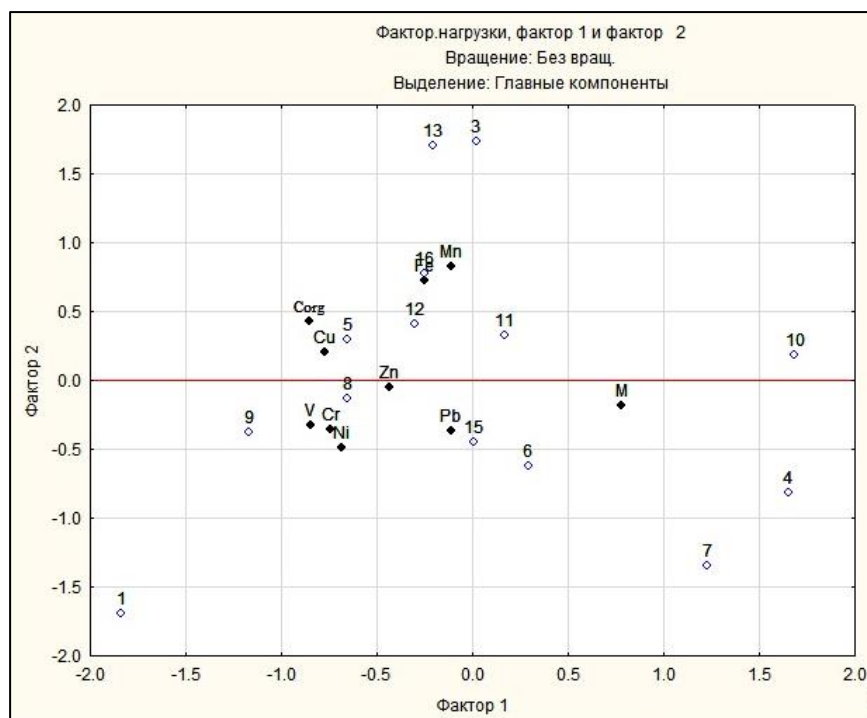


Рис. 37. Результаты факторного анализа (Ф1 и 2) для валового содержания металлов (значения факторов для элементов и точек)

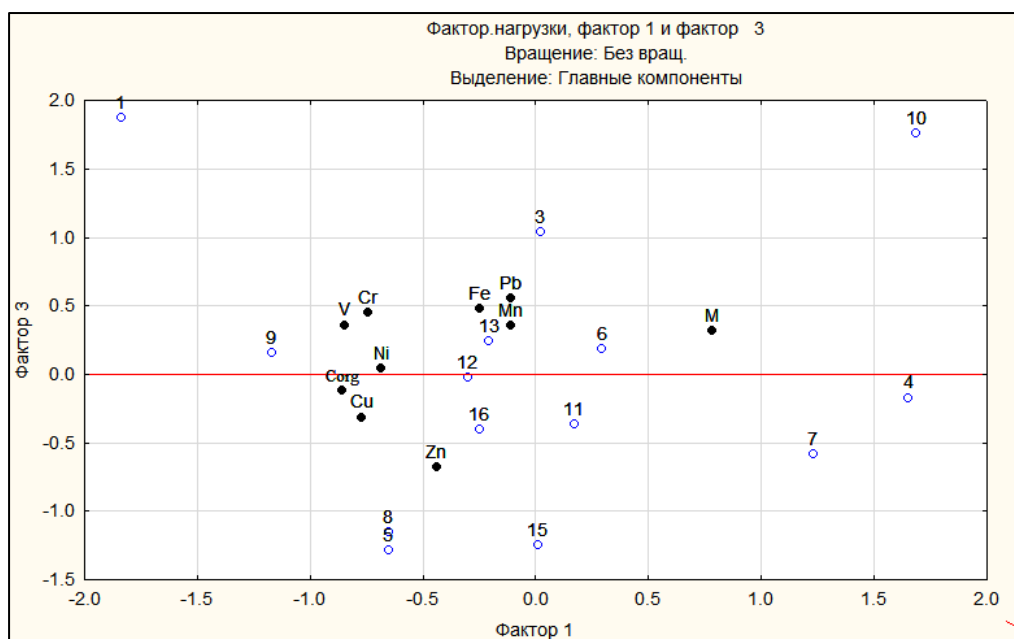


Рис. 38. Результаты факторного анализа (Ф1 и 3) для валового содержания металлов (значения факторов для элементов и точек)

Третий фактор не выделяет явно элементы, но существенно влияет на точки 1 и 10 (рис. 38), в которых часто замечены повышенные концентрации многих элементов, что позволяет связать этот фактор с антропогенным влиянием.

Для доли подвижных форм ситуация другая (табл. 20, рис. 39).

Таблица 20. Значения факторов для элементов в подвижных формах

Элемент	Ф1	Ф2	Ф3
Fe	0,71	0,38	0,51
Ni	-0,60	0,52	-0,23
Cr	0,48	-0,43	-0,75
Cu	-0,86	-0,04	0,11
Zn	0,40	0,78	-0,29
Pb	-0,85	0,45	-0,07
Cd	0,53	0,70	-0,32
Co	-0,69	0,62	-0,09
Mn	0,54	0,62	0,24
Общ. дисперсия	3,77	2,67	1,14
Доля дисперсии	0,42	0,30	0,13

$$\Phi 1: \frac{\text{Fe (0,71) Mn(0,54) Cd(0,53)}}{\text{Cu(-0,86) Pb(-0,85) Co(-0,69) Ni(-0,60)}}$$

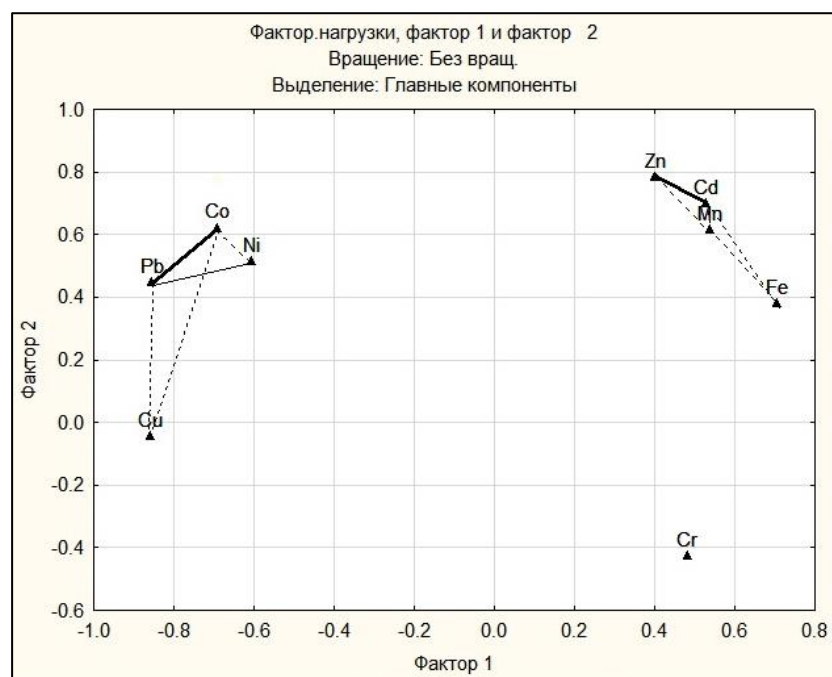


Рис. 39. Результаты факторного анализа (Ф1 и 2) для доли подвижных металлов

По первому фактору явно выделились две группы металлов: Cu, Pb, Co и Ni и Zn, Cd, Mn и Fe. Можно предположить, что он отражает форму нахождения элементов в донных осадках: обменную (первая группа) или карбонатную (вторая). Для более точного определения второго фактора добавим значения факторов для проб (рис. 39).

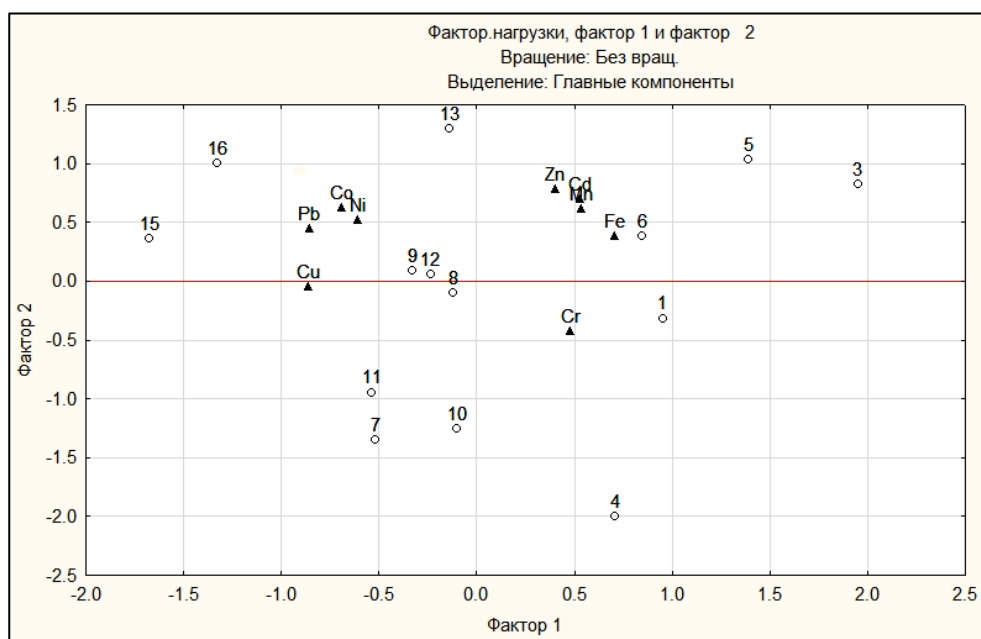


Рис. 40. Результаты факторного анализа (Ф1 и 2) для доли подвижных металлов (значения факторов для элементов и точек)

Пробы вновь выстроились вдоль по оси Ф2 согласно гранулометрическому составу: от песчаных осадков (4, 7, 10, 11) до 3, 5, 13 и 16, представленных пелитами. Поэтому можно сделать вывод о том, что все металлы в подвижных формах, кроме Си и Сг, тяготеют к илистым осадкам.

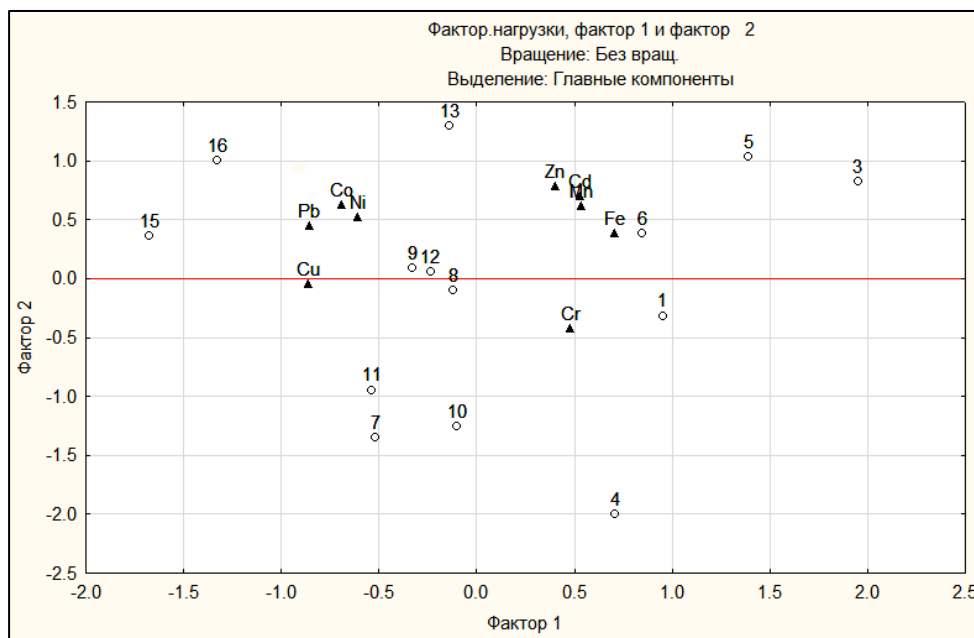


Рис. 41. Результаты факторного анализа для доли подвижных металлов (значения факторов для элементов и точек)

Пробы вновь выстроились вдоль по оси Ф2 согласно гранулометрическому составу: от песчаных осадков (4, 7, 10, 11) до 3, 5, 13 и 16, представленных пелитами. Поэтому можно сделать вывод о том, что все металлы в подвижных формах, кроме Си и Сг, тяготеют к илистым осадкам.

Выводы

По результатам проведённых исследований можно сделать некоторые выводы. Успешно проведённые полевые работы в августе 2016 года позволили изучить объект на местности и отобрать пробы донных осадков, послуживших материалом для нескольких типов анализа и главным источником данных. Изучение гранулометрического состава позволило выделить 6 типов осадков: алевритовые пелиты, песчано-алевритовые пелиты, песчано-пелитовые алевриты, алевритовые пески, пелитовые пески и пески мелкозернистые и сделать вывод о том, что в озере преобладают мелкообломочные плохо сортированные отложения. Количество органического углерода велико (чуть выше 14%).

Изучение литературных данных о состоянии воды указывает на некоторую эвтрофикацию озера. Среди признаков этого явления можно отметить неоднократное превышение норматива ($\text{ПДК}_{\text{рыбхоз}}$) показателями ХПК и БПК₅. Рассчитанный ИЗВ показал сильную степень загрязнения воды, но высокие природные концентрации Mn, Cu и Fe, составивших значительный вклад в этот показатель, не позволяют определить реальные масштабы загрязнения. Можно лишь указать обнаруженные компоненты, имеющие антропогенное происхождение и превысившие нормативы за изучаемый период времени: пестициды, нефтепродукты, аммиачный азот и азот нитритов. В организмах, обитающих в озере, происходит накопление тяжёлых металлов, содержания Zn, Fe и Cu в отдельных органах рыб выше, чем в соседних озёрах.

На основе результатов анализа химического состава донных отложений можно сделать выводы о распределении элементов на дне озера. Во многих случаях большие концентрации металлов как в подвижных формах, так и их валовое содержание связаны с мелким гранулометрическим составом и/или высоким содержанием органики. Исключением является Cu, которая активно переходит в подвижную форму в осадках, представленных крупными фракциями. Примером аномалии распределения валового содержания можно назвать Fe, количество которого вне зависимости от типа осадков максимально в юго-западной части озера около места для стоянки туристов. Также высокие концентрации часто наблюдаются в зонах впадения Безымянного ручья (на северо-западе) и реки Сапшанки (на юго-востоке) в озеро, что говорит об их вкладе в формирование в том числе химического состава осадков и позволяет сделать предположение о загрязнении этих водотоков выше по течению. Подсчёт доли подвижных форм в валовом содержании выявил увеличение подвижности некоторых металлов (Ni, Pb, Zn) в северной части озера вблизи пос. Пржевальское, а также мест туристических стоянок.

Расчёт суммарного загрязнения донных осадков за 3 года позволяет сравнить данные показатели. Отличия не слишком велики (определённый уровень загрязнения – низкий или средний), но они присутствуют. Если в 2014-2015 гг. повышенные значения показателя в целом согласуются с участками естественного накопления тяжёлых металлов (в глубоководных участках с илистыми осадками), то в 2016 году ситуация несколько иная – заметно увеличение показателя вблизи областей, находящихся под антропогенным воздействием (рядом с населёнными пунктами). Расчёт показателя разными способами в 2016 г. также помогает выявить аномальные величины: содержание Cu и Pb часто превышают фоновые значения в обоих случаях. Нужно отметить, что использование в качестве фона кларков элементов в песчаниках не является абсолютно уместным в данных условиях, так как донные осадки в озере часто образованы более мелкими частицами. Тем не менее, применение более точного метода химического анализа отложений в 2016 году позволяет сделать вывод о некотором антропогенном влиянии на состояние озера, проявляющемся в загрязнении донных осадков, а значит и воды.

Литература и Интернет-источники

1. Алексеев Я. Я. Растительный покров Смоленской области. Смоленск: Смол. обл. гос. изд-во, 1949, 156 с.
2. Алексеенко В. А., Алексеенко А. А. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов, Ростов н/Д: Изд-во Южного Федерального университета, 2013, 388 с.
3. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Смоленской области в 2010 году», Администрация Смоленской области. Смоленск: Смоленская городская типография, 2011, 251 с.
4. Климов А. И. Природа Смоленской области. Смоленск: Смолгиз, 1951, 100 с.
5. Кононова Л.А., Зеленковский П.С., Подлипский И.И. Методика проведения эколого-геологической оценки состояния донных отложений озера Сапшо (национальный парк «Смоленское Поозерье»). / Материалы XV межвузовской молодежной научной конференции «Школа экологической геологии и рационального недропользования». СПб.: Изд-во СПбГУ, 2015, с. 52-57;
6. Кучинский П. А. Почвы Смоленской области и способы повышения их плодородия. Смоленск: Смол. обл. гос. изд-во, 1950, 318 с.
7. Маймусов Д. Ф. Почвы Смоленской области (Генезис, состояние, управление плодородием). М.: Прометей, 1992, 286 с.
8. Национальный парк "Смоленское Поозерье" справочно-информационное издание. Смоленск: Маджента, 2006, 79 с.
9. Огрызкова О.С., Эйрих А.Н., Серых Т.Г. и др. Сезонные изменения содержания марганца в воде Новосибирского водохранилища. // Известия АлтГУ, 2014. №3 С. 176-180.
10. Опекунов А. Ю. Экологическая седиментология. Учебное пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2012, 224 с.
11. Опекунова М. Г., Арестова И. Ю., Елсукова Е. Ю. Методы физико-химического анализа почв и растений. СПб: Изд-во СПбГУ, 2002, 68 с.
12. Основные направления развития национального парка "Смоленское Поозерье" на 2002-2006 годы. Москва-Пржевальское, 2002, 30 с.
13. Погуляев Д. И. Геология и полезные ископаемые Смоленской области. Т. 1: геология. Смоленск: Кн. изд-во, 1955, 248 с. (а)
14. Погуляев Д. И. Геология и полезные ископаемые Смоленской области. Т. 2: полезные ископаемые. Смоленск: Кн. изд-во, 1955, 319 с. (б)

15. Погуляев Д. И., Природные условия Смоленщины и влияние их на сельскохозяйственное производство. Смоленск: Кн. изд-во, 1959, 50 с.
16. Погуляев Д. И., Шостына А. А. Природа и физико-географические (природные) районы Смоленской области. Смоленск: Кн. изд-во, 1963, 128 с.
17. Подлипский И.И. Методика эколого-геологической оценки территории полигона бытовых отходов (пос. Пржевальское, Смоленская область). / Материалы IV международных чтении памяти Н.М. Пржевальского: «Творческое наследие Н.М. Пржевальского и современность». Смоленск: Изд-во «Маджента», 2014, с. 120-123
18. Природа Смоленской области: Геология, рельеф, почвы - сборник статей под ред. Д. Ф. Маймусова. Кафедра физ. географии. - Смоленск: Б. и., 1973, 142 с.
19. Романовский С. И. Седиментологические основы литологии, Ленинград: Недра, 1977, 408 с.
20. Третьяков В. Ю., Селезнев Д. Е. Применение геоинформационных систем в геоэкологических исследованиях. СПб: Изд-во РГГМУ, 2008. 208 с.
21. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный парк Смоленское Поозерье» Летопись природы, книги 7 – 10, 2013-2016 гг.
22. Шкаликов В. А., Ерашов М.А., Борисовская И.А. Особо охраняемые природные территории Смоленской области. Смоленск: Универсум, 2005, 433 с.
23. <http://www.prjevalskoe.ru> - Посёлок Пржевальское, 10 марта 2017.
24. <http://www.poozerie.ru> - Официальный сайт Национального парка «Смоленское Поозерье», 29 апреля 2017.